

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**“DESEMPEÑO DE DESHIDRATADOR TIPO TÚNEL CON
DEPENDENCIA DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD PARA
PRODUCTOS AGRÍCOLAS”**

POR

ASHLEY BAUTISTA AGUIRRE

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE**

DICIEMBRE 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**“DESEMPEÑO DE DESHIDRATADOR TIPO TÚNEL CON
DEPENDENCIA DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD PARA
PRODUCTOS AGRÍCOLAS”**

POR

ASHLEY BAUTISTA AGUIRRE

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE**

DIRECTOR
DR. ARTURO MORALES FUENTES

DICIEMBRE 2016

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



TESIS

**“DESEMPEÑO DE DESHIDRATADOR TIPO TÚNEL CON DEPENDENCIA
DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD PARA PRODUCTOS AGRÍCOLAS”**

**POR
ASHLEY BAUTISTA AGUIRRE**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE**

**DIRECTOR
DR. ARTURO MORALES FUENTES**


SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN,


DICIEMBRE 2016

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERÍA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis **Desempeño de deshidratador tipo túnel con dependencia de la temperatura y humedad, para productos agrícolas** realizada por el alumno Ashley Bautista Aguirre, con número de matrícula 1757847, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

El comité de tesis


Dr. Arturo Morales Fuentes
Director


M.C. Miguel García Yera
Co-director


Dr. Antonio Flores Tlacuahuac
Revisor


Dr. Santos Méndez Díaz
Revisor

Vo. Bo


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Diciembre 2016

Dedicatoria

Este trabajo es para las siguientes personas, Leticia Aguirre López quien me acompaña a lo largo de mi camino sonriendo a pesar de las circunstancias difíciles. Perla Bautista Aguirre por su apoyo incondicional y esos momentos de alegría. Mi tía Elizabeth Bautista, ella siempre tiene un buen humor para todos, a Sandyli Castillo por todo el tiempo brindado. A mis amigos Adrián, Christian, Alfredo y André con los que he pasado muchas aventuras. Por último a la profesora Rocío Zumaya por motivarme a iniciar este viaje en el cual he aprendido demasiado.

Los que luchan:

Hay hombres que luchan un día y son buenos;

Hay hombres que luchan un año y son mejores;

Hay otros que luchan muchos años y son muy buenos;

Pero hay quienes luchan toda la vida;

Esos son los impredecibles.

Bertolt Brecht

Agradecimientos

Antes que nada a mi familia por darme espacio temporal en este trayecto de mi vida. Dándome apoyo incondicional y no quitarme su atención un solo día a pesar de la distancia.

Al Doctor Arturo Morales Fuentes por sus enseñanzas, por su tiempo, por apoyarme y confiar en mis capacidades, siendo para mí un modelo a seguir. Mi formación y trabajo son fruto de su trabajo realizado con vocación.

Los Profesores Santos Méndez, Jaime Armendáriz, Elvira Martínez, Max Salvador Hernández por las enseñanzas en el aula, las cuales me acompañaran siempre.

A Magui por su paciencia y apoyo incondicional haciendo más esplendido mi estancia como estudiante.

Mis hermanos de generación Omar Torres, Jessica Casanova, José Enrique Camacho, por compartir momentos de alegría y adversidad durante este viaje llamado Maestría.

A las chicas del CIDET por compartir el café en las mañanas y a mis compañeros pertenecientes al grupo de investigación, por esos eventos denominados Becatones, espero que nunca se pierda la tradición, puesto que siempre serán una oportunidad para volvernos a encontrar.

Al resto del grupo académico del programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable, por darme la oportunidad de integrarme y de ejercer mis estudios de posgrado. Siempre dispuestos a colaborar con sus conocimientos y experiencia para juntos ser un mejor programa.

Por ultimo quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca que me permitió realizar mis estudios de posgrado. Contribuyendo a mi formación profesional para ser una persona consiente y responsable del desarrollo social económico y ambiental. Que además con la investigación desarrollada me permitió presentar parte de los resultados en el XXXVII Encuentro Nacional de la AMIDIQ.

Índice General

Índice de Figuras	IV
Índice de Tablas	VI
Resumen	VII
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos y alcances	3
1.2.1 Objetivos específicos	4
1.3 Hipótesis	4
1.4 Descripción de capítulos	4
Capítulo 2. El secado	6
2.1 El secado por convección	6
2.2. Psicrometría	7
2.3. Contenido de humedad en los sólidos	10
2.3.1 Contenido de humedad en equilibrio	11
2.3.2. Propiedades de sorción de humedad	12
2.3.3 Modelos de sorción	14
2.4 Transferencia de calor	17
2.5. Transferencia de masa	19
2.5.1 Modelos de tasa secado	24
2.6. Periodos del secado	29
2.6.1 Periodo de tasa de secado constante	29
2.6.2 Periodo de tasa de secado decreciente	29

2.7 Equipos de secado	31
2.7.1 Clasificación según la transferencia de calor	38
2.7.2 Clasificación según el método de secado	39
Capítulo 3. Metodología	40
3.1 Introducción	40
3.2 Selección de los modelos de sorción y de tasa de secado	41
3.2.1 Selección del modelo de desorción	42
3.2.2 Selección del modelo de tasa de secado	42
3.3 Modelo de un secado por etapas	43
3.3.1 Consideraciones para el estudio	44
3.3.2 Propiedades físicas del aire y producto	45
3.3.2 Balance de materia	46
3.3.3 Balance de energía	48
3.3.4 Determinación del cambio de temperatura y humedad relativa	49
3.4 Implementación de códigos de simulación	50
3.5 Análisis de sensibilidad	51
Capítulo 4. Resultados	52
4.1 Introducción	52
4.2 Selección de los modelos de desorción	52
4.3 Selección de los modelos de cinética de secado de chile	55
4.4 Efecto de la temperatura en el secado	58
4.5 Efecto de la humedad relativa en el secado	59
4.6 Curva de operación de un secador	60
4.7 Configuración de un secador	62
4.8 Análisis de temperatura en el secado por etapas	66

4.9 Análisis de humedad relativa en el secado por etapas	67
4.10 Análisis de la velocidad en el secado por etapas.....	69
4.10 Análisis de tiempo de residencia	71
Capítulo 5. Conclusiones	73
Nomenclatura	76
Bibliografía	78

Índice de Figuras

Figura 1.- Ejemplificación del secado de un sólido húmedo	7
Figura 2.- Carta psicrométrica.....	8
Figura 3.- Diagrama típico de isotermas de sorción	13
Figura 4.- Esquema de entrada y salida de energía para un secador adiabático ..	17
Figura 5.-Flujo de masa en un paralelepípedo	20
Figura 6.- Modelos de secado en capa final	25
Figura 7.- Curvas de periodos del secado	30
Figura 8.-Secador de tornillo transportador	32
Figura 9.- Turbosecador [13].....	33
Figura 10.- Secador de túnel [40]	34
Figura 11.- Secador de tambor doble con calentamiento central [13]	34
Figura 12.- Secador rotatorio [35].....	35
Figura 13.- Secado de lecho fluidizado [41]	36
Figura 14.- Secador de banda transportadora, con calentamiento interno de vapor	36
Figura 15.- Secador de tipo charola	37
Figura 16.-Esquema del secado en paralelo	46
Figura 17. Esquema de secado en contracorriente.....	47
Figura 18 Algoritmo de programación de secado en Paralelo	51
Figura 19 Algoritmo de programación de secado en contraflujo	51
Figura 20.- Isotermas de equilibrio para Chile a 20°C.	54
Figura 21.- Isotermas de equilibrio para Chile a 60°C.....	54
Figura 22.- Relación de humedad vs tiempo de secado [2].	55
Figura 23.- Comparación del modelo de Kaleemulah bajo condiciones de secado en capa fina y en un secador rotatorio.	56
Figura 24.- Comparación de curvas de tasas de secado experimentales y predichas a 60 °C.....	57
Figura 25.- Curvas típicas de operación de secadores por convección bajo distintas temperaturas de aire.	59
Figura 26.- Curvas de operación incluyendo la humedad relativa constante como parámetro en el proceso.	60
Figura 27.- Curva de operación de un secador por etapas, evaluando únicamente la temperatura.	61

Figura 28.- Contenido de humedad para las configuraciones en paralelo y en contracorriente.....	63
Figura 29.-Perfil de contenido de humedad y saturación del aire para un arreglo en paralelo.....	63
Figura 30.- Perfil de contenido de humedad y saturación del aire para un arreglo en contraflujo.....	64
Figura 31.- Perfil de temperatura y humedad relativa del aire para un en arreglo paralelo.....	65
Figura 32.- Perfil de temperatura y humedad relativa del aire para un arreglo en contraflujo.....	65
Figura 33.- Efecto de la temperatura para secado en paralelo y en contracorriente.	66
Figura 34.- Curvas de reducción de humedad con arreglo en paralelo a diferente humedad relativa.....	67
Figura 35.- Curvas de reducción de humedad con arreglo en contraflujo a diferente humedad relativa.....	69
Figura 36.- Efecto de velocidad en el contenido de humedad durante el secado con en paralelo.	70
Figura 37.- Efecto de la velocidad en el contenido de humedad durante el secado en contraflujo.	70
Figura 38.- Curvas del contenido de humedad en secado con arreglo en paralelo variando el tiempo de residencia.....	72
Figura 39.- Curvas del contenido de humedad para secado con arreglo en contraflujo variando tiempo de residencia.	73

Índice de Tablas

Tabla 1.- Modelos de isotermas de equilibrio	14
Tabla 2.- Modelos de tasa de secado.....	25
Tabla 3.- Constantes para ajustes para modelos de desorción de chile, coeficientes de determinación R ² y RMSE.....	53
Tabla 4. Constantes obtenidas para el modelo de Kaleemullah para predecir el secado de mango y plátano con sus respectivos valores de R ² y RMSE.....	57

Resumen

El secado es el proceso de reducción del contenido de humedad un nivel tal que permite conservar los alimentos por periodos de tiempo largos. Es el método de conservación más antiguo utilizado por la humanidad y se busca preservando las propiedades organolépticas como color, textura y aroma de los productos.

En la actualidad, uno de los equipos más utilizados para deshidratar hortalizas es el secador de tipo túnel por convección forzada. En éste se aumenta la temperatura del aire mediante una fuente de energía externa y se hace circular por un conjunto de charolas con sólido húmedo. A medida que el aire avanza, reduce su temperatura y aumenta la humedad relativa reduciendo su potencial de secado. Hasta el momento, la mayoría de los estudios reportados en la literatura, se centran en determinar las curvas de secado en capa fina, dejando de lado el efecto que la humedad relativa del aire tendría en un túnel de secado.

En este trabajo se presenta un modelo de secado en el que cada charola se analiza como una etapa en la que el sólido húmedo y el aire tienden a un equilibrio térmico y de concentración de agua, el cual se alcanzaría en un tiempo infinito. Según el tiempo de residencia, se determinan las condiciones del aire y sólido a la salida de cada etapa y se logra evaluar un secado bajo un esquema más aproximado a la realidad. Se estudia el efecto de un secado con diferentes arreglos de flujo y se analiza el efecto de las condiciones de operación de velocidad, temperatura, humedad relativa y tiempo de residencia. Los resultados del estudio son de interés para el diseño de nuevos equipos de secado, y para la operación determinar condiciones de menor consumo de energía.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Motivación

La producción de alimentos a nivel mundial es de gran importancia para determinar la calidad de vida de la población de un país. México tiene una abundancia de recursos naturales, que lo posicionan como un país productor de alimentos. Ocupando en el 2014 el tercer lugar en Latinoamérica y el duodécimo en el mundo [1]. Actualmente es el principal proveedor de frutas y hortalizas a Estados Unidos desde 1980 [2].

La hortaliza más producida y exportada por México es el chile. Cuya producción en el 2015 fue de 2.7 millones de toneladas, con lo cual el país ocupó el segundo lugar en la producción de chile a nivel mundial [3]. A nivel nacional el chile es el 8° cultivo con valor agregado y se estima que en México el consumo anual per cápita de esta hortaliza es de 15 kg [4]. De las especies de chile que se producen, las más conocidas y domesticadas son morrón (*Capsicum annuum*), ají cristal (*Capsicum baccatum*), habanero (*Capsicum chinense*), Tabasco (*Capsicum frutescens*) y Manzano (*Capsicum pubescens*) [5]. Estas especies de chile tienen un alto contenido de vitamina C y capsaicina (analgésico y antioxidante), añadiendo un valor nutricional y medicinal en el mercado.

La reducción de mermas en la producción de chile durante la cosecha y pos-cosecha ayuda a satisfacer la demanda y mantener los precios en el mercado. Las mermas son causadas por plagas, hongos y condiciones climáticas, que contribuyen al deterioro no solo de chile, sino también de otras hortalizas. En México las pérdidas en los alimentos ascienden a un 37.26% de las cuales gran parte son frutas y hortalizas [6]. Las mermas en la producción de hortalizas se reducen utilizando procesos de preservación, cuya finalidad es prolongar la vida de anaquel de productos perecederos. Los procesos de preservación más destacados son el congelamiento, enlatado y secado [7].

El secado es el proceso de preservación más antiguo y utilizado por la humanidad. Consiste en reducir el contenido de humedad y preservar las propiedades organolépticas como color, textura y aroma de los productos, sin impactar de manera importante la calidad para su comercialización en el mercado[8].

En las zonas rurales el secado de hortalizas se realiza exponiendo el producto bajo el sol. Dejando los productos al alcance de las condiciones climáticas, polvo, insectos y microorganismos, bajo estas condiciones, la tasa de secado es lenta. Además existen inconvenientes como la, contaminación ambiental y el requisito de mano de obra [9]. A gran escala el secado se lleva a cabo utilizando equipos de convección forzada de aire caliente. Más del 85% de los secadores industriales son de este tipo y se utilizan principalmente para deshidratar con alto contenido de humedad [7]. Durante el secado por convección forzada el aire caliente se hace circundar un sólido húmedo reduciendo su humedad hasta un valor deseado.

El secado es un proceso intensivo que requiere de energía para llevarse a cabo. En países como Francia y Canadá, la energía que consumen los equipos de secado corresponde al 15% de la energía consumida por la industria alimenticia [10]. En México no se tiene registro del consumo energético de los equipos de secado. Solamente existe el registro del consumo energético de la industria alimenticia que equivale a 1.0720 MWh [11].

La diferencia entre el contenido de humedad de un sólido por unidad de tiempo, se denomina tasa de secado, su determinación es compleja y particular de cada sólido. Puesto que influyen características como: el área de la superficie del sólido, la porosidad, permeabilidad de la cubierta al paso del agua difusión en el interior del sólido y contenido de humedad. Además existe un efecto provocado por las condiciones externas al sólido como: la temperatura, humedad relativa y flujo de aire. De manera experimental el secado se realiza en equipos considerando únicamente como parámetros la temperatura del aire, el contenido de humedad del producto y tiempo de residencia.

Uno de los equipos más utilizados para deshidratar hortalizas es el secador de tipo túnel por convección forzada. En este secador se aumenta la temperatura del aire mediante una fuente de energía convencional como leña, diésel o gas. Posteriormente el aire circunda un sólido húmedo reduciendo su contenido de humedad. Conforme el producto avanza sobre charolas es expuesto a diferentes condiciones del aire durante su trayectoria.

A medida que el aire se aproxima a la última charola aumenta la humedad relativa, limitando el contenido de humedad que el sólido puede alcanzar. La humedad relativa es un parámetro que ha sido poco estudiado y no se encuentran reportes en la literatura abierta de evaluación y diseño.

Incluir la humedad relativa como un parámetro de diseño en el proceso de secado, permite el diseño y evaluación más realista y eficiente de los equipos de secado. La evaluación del consumo de energía en el proceso de secado también se verá afectado con la consideración de la humedad relativa. Esta situación representa una oportunidad para realizar un estudio del secado de chile por etapas. Evaluando la temperatura y humedad relativa, hasta alcanzar un contenido de humedad deseable sin afectar la calidad del producto.

1.2 Objetivos y alcances

El objetivo de este trabajo es evaluar el proceso de deshidratación de hortalizas en un secador de tipo túnel con charola. Considerando cada charola del secador como una etapa del proceso. En cada etapa se determina una tasa de secado utilizando aire bajo condiciones específicas de temperatura, humedad relativa y velocidad. Se evalúa la configuración de flujo entre el producto y el aire, proporcionando una guía para nuevos diseños. En la cinética de secado se evalúan las condiciones de operación bajo las cuales el producto se seca como la temperatura, velocidad del aire, tiempo de residencia asimismo el equilibrio entre la humedad relativa del aire y el contenido de humedad del sólido. Lo cual permite evaluar la sensibilidad de las variables en el proceso de secado. Un análisis en el consumo de energía permite determinar las características del proceso para lograr un contenido de humedad de menor consumo.

1.2.1 Objetivos específicos

Para la evaluación del proceso de deshidratación de productos agrícolas, se han determinados los siguientes objetivos específicos.

- Evaluación de modelos semi-empíricos de isothermas de desorción y la tasa de secado, capaces de representar de manera confiable las condiciones del producto bajo diferentes condiciones de operación.
- Evaluación del tiempo de secado por etapas de un secador tipo charola en túnel, sujeto a diversas condiciones de operación.
- Selección de condiciones y geometrías con menor consumo de energía logrando los contenidos de humedad deseados.

1.3 Hipótesis

La combinación de los efectos de las diferencias de temperatura y concentración en un secado por convección no ha sido explorada en la literatura abierta. Es posible realizar predicciones más reales y evaluar el proceso de secado, bajo diferentes condiciones y configuraciones, identificando las más favorables. Con esto se logra alcanzar un contenido de humedad en menor tiempo impactando de manera importante el consumo de energía.

1.4 Descripción de capítulos

El presente documento consta de cinco capítulos: 1) Introducción, 2) Estado del arte del secado, 3) Metodología, 4) Resultados y 5) Conclusiones.

El capítulo 1 detalla sobre la motivación y objetivos de este estudio, formulando una hipótesis, finalizando con la descripción de los capítulos involucrados, siguiendo el método científico.

El capítulo 2 hace una descripción y explicación del proceso de secado y de los parámetros involucrados. Además se realiza una breve revisión en la literatura abierta, de los modelos y estudios de tasa de secado de hortalizas por convección. También se abordan las propiedades, modelos y estudios de isothermas de sorción para hortalizas. Por último se describen los distintos diseños de equipos de secado más utilizados en la industria.

En el capítulo 3, se presenta la metodología empleada para la evaluación del proceso de deshidratación en un secador tipo túnel por etapas. Se considera que el proceso de secado se realiza en paralelo y contracorriente. Consiste en los siguientes pasos 1) Selección de los modelos de sorción y cinética de secado, realizada mediante una validación estadística en base a criterios encontrados en la literatura. 2) Modelado de un secador mediante la ejecución de los balances de masa y energía en cada etapa. A partir de conocer la cantidad de agua evaporada utilizando los modelos de sorción y de cinética de secado seleccionados. 3) Implementación de los códigos de simulación utilizando software, cuya finalidad permite facilitar los cálculos de las ecuaciones empleadas para configuración en paralelo o contracorriente. 4) Análisis de sensibilidad de las variables involucradas en el estudio como temperatura, humedad relativa, velocidad del aire y tiempo de residencia en cada etapa.

En el capítulo 4, se muestran, y discuten los resultados obtenidos, primeramente del ajuste y validación de los modelos de sorción y cinética de secado. Posteriormente se hace una comparación de la reducción de humedad de un chile del género *capcicumm annum* utilizando un deshidratador tipo túnel con arreglo en paralelo y en contracorriente. Asimismo de la evaluación del comportamiento de las condiciones de temperatura humedad relativa velocidad y tiempo de residencia del aire en cada etapa.

El capítulo 5, en base a los resultados obtenidos para un caso de estudio específico se formulan y muestran las conclusiones del presente estudio, Asimismo se hacen recomendaciones de trabajos futuros cuya finalidad es profundizar y ampliar en los conocimientos involucrados del presente tema.

Capítulo 2. El secado

2.1 El secado por convección

En la industria alimenticia el secado se realiza principalmente con dos propósitos, 1) La preservación de alimentos, reduciendo el daño microbiano provocado por la actividad del agua. 2) Reducción de costos para el transporte y el almacenamiento, al reducir la humedad contenida de los alimentos también se reduce el peso. Principalmente en las hortalizas donde el contenido de humedad llega a ser hasta el 90% de su peso [12].

La humedad contenida puede ser separada de los sólidos por métodos mecánicos, los cuales son más económicos, que utilizar un método térmico. Sin embargo los métodos mecánicos no alcanzan un contenido de humedad, lo suficientemente bajo para inhibir la actividad microbiana. Además la fuerza mecánica que se aplica daña por completo el aspecto físico y comercialización de los productos. Motivo por el cual equipos como prensas o bombas centrífugas no se consideran equipos de secado [13] y [14].

El secado o deshidratación es un método térmico que involucra simultáneamente la transferencia de calor y masa. Consiste en reducir el contenido de humedad de un sólido húmedo, mediante la aceleración de la evaporación, suministrando calor. La humedad contenida en el sólido debe migrar desde el interior del sólido hacia la superficie [15]. En la Figura 1 muestra un esquema típico del secado, donde el calor se suministra con aire caliente, el cual circunda el sólido y por adsorción capta la humedad que proviene del sólido.

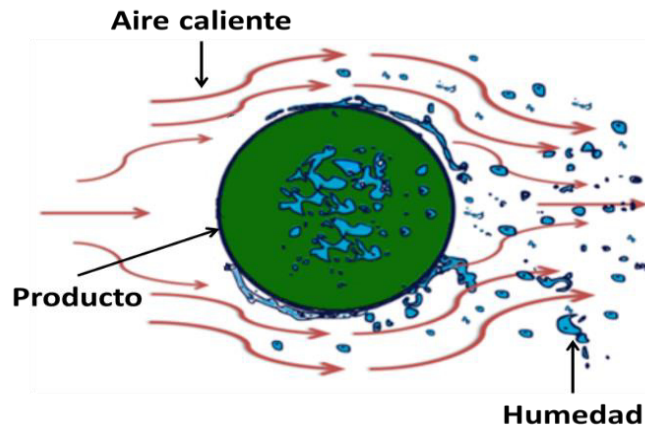


Figura 1.- Ejemplificación del secado de un sólido húmedo

Al incrementar la temperatura del sólido húmedo disminuye la presión parcial de vapor del aire por debajo de la presión parcial de vapor de humedad contenida del producto. La relación entre el cambio de la temperatura y las propiedades del aire húmedo es estudiada por una rama de la termodinámica conocida como psicrometría

2.2. Psicrometría

Las propiedades psicrométricas son: Temperatura del aire T_a medida en bulbo seco o húmedo, la presión de saturación de vapor del aire saturación P_{vs} , la humedad absoluta del aire H_A , humedad relativa HR , calor específico del aire C_{pa} , entalpía del aire H_a , densidad ρ_a . A partir del conocimiento de dos de ellos, es posible determinar las demás. De manera práctica se utiliza una carta psicrométrica que permite de una manera gráfica realizar una evaluación rápida de las propiedades en un estado. En la Figura 2 se presenta una carta Psicrométrica para aire húmedo a presión atmosférica, tomada del estándar ASHRAE [16].

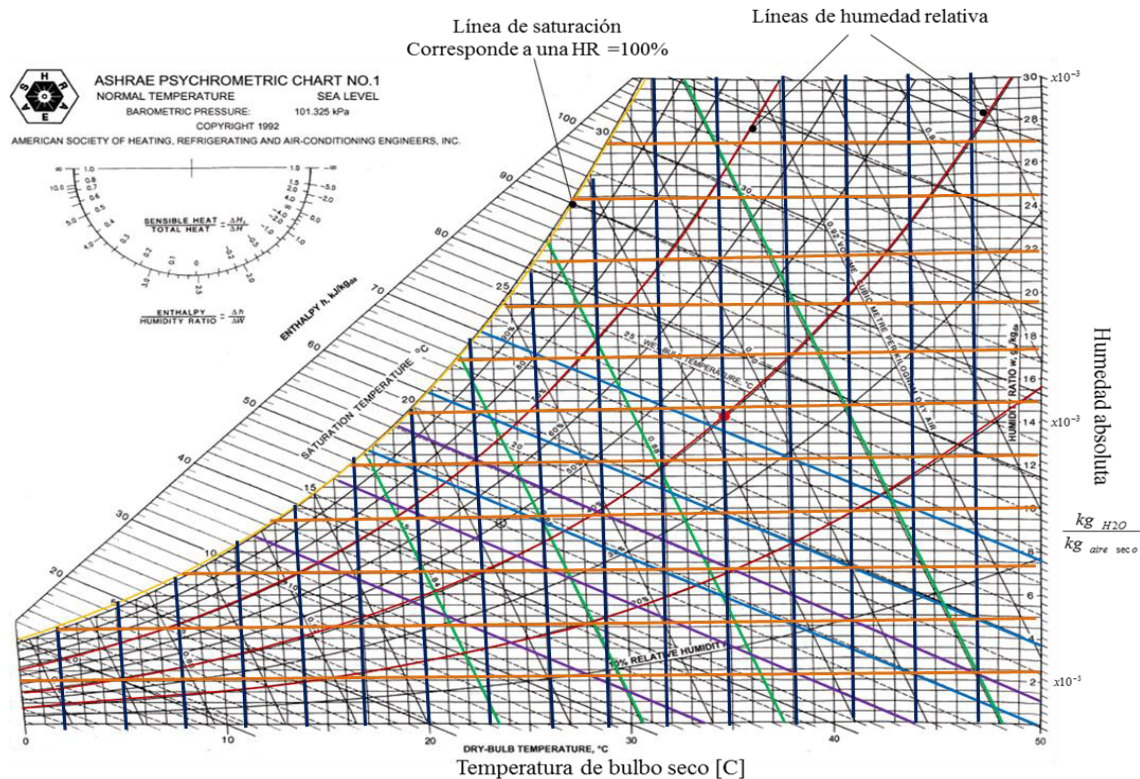


Figura 2.- Carta psicrométrica

A continuación se describen las propiedades que se muestran en la carta psicrométrica. Estas propiedades se pueden determinar mediante el uso de las ecuaciones correspondientes que dependen de la temperatura del aire T_a medida en bulbo seco (T_{Bs}) adecuadas para rango entre -10°C a 120°C (-35°F a 600°F).

- **Temperatura de bulbo húmedo:** Es la temperatura medida con un termómetro ordinario cuyo bulbo está envuelto con un pañuelo de algodón húmedo. Son representadas por las líneas inclinadas aproximadamente 20° del eje de ordenadas.
- **Temperatura de bulbo seco:** Es la temperatura medida con un termómetro ordinario con el bulbo totalmente seco, este se debe estar sombreado para reducir efectos de la radiación directa, es simbolizada mediante líneas verticales

- **Presión de saturación del aire:** Se refiere al valor de presión atmosférica en el cual, el vapor contenido en el aire se condensa. La presión de saturación P_{vs} , se puede obtener de la correlación expresada en (1). En la carta psicrométrica corresponde a la curva de saturación en el extremo izquierdo.

$$P_{vs} = 0.00055444 * T_a^3 - 0.00193674 * T_a^2 + 0.469247 * T_a + 4.37548 \quad (1)$$

- **Presión parcial de vapor:** Es la presión ejercida por el vapor P_v , en una mezcla de gases como el aire, puede ser encontrada a partir de (2).

$$P_v = (HR/100) * P_{vs} \quad (2)$$

- **Humedad absoluta:** Cantidad de vapor de agua presente en un metro cubico de aire, también se puede expresar como la razón entre la masa de vapor y la masa de aire seco como se muestra en (3). Se ubica en la ordenada de la carta psicrométrica.

$$HA = \frac{0.62 * P_v}{P_{atm} - P_v} = \frac{m_{aca}}{m_{as}} \quad (3)$$

- **La humedad relativa:** Es la relación entre la presión parcial del vapor P_v y la presión de saturación del aire P_{vs} a la misma temperatura, expresada en (4):

$$HR = \left(\frac{P_v}{P_{vs}} \right) \times 100 \quad (4)$$

- **Masa de agua contenida en el aire,** se obtienen a partir de la ecuación (5), considerando el aire como un gas ideal:

$$m_{aca} = \frac{P_v * v}{R_v(T_a + 273.15)} \quad (5)$$

- **Entalpia del aire húmedo,** es la cantidad de energía calorífica contenida en el aire como se muestra en la ecuación (6).

- Este parámetro es representado por las líneas inclinadas a 135° respecto al eje de las abscisas en la carta psicométrica.

$$H = C_{pa}T_a + HA(h_{fg} - C_{pH_2O}T_a) \quad (6)$$

2.3. Contenido de humedad en los sólidos.

El conocimiento de conceptos psicométricos permite evaluar el comportamiento del aire durante y al finalizar el proceso de deshidratación. Sin embargo también se requiere saber las propiedades del producto sometido a secado. Los sólidos húmedos como hortalizas son materiales higroscópicos por lo que tienen la capacidad de absorber y retener humedad del medio que los rodea.

La cantidad de humedad retenida es la principal responsable del crecimiento microbiano y consecuente deterioro de hortalizas. Un producto agrícola puede almacenarse por largos periodos de tiempo, cuando su contenido de humedad es bajo. La masa de un sólido húmedo es la adición de la masa seca y la masa de agua captada como se muestra en la ecuación (7)

$$m_{sh} = m_{acs} + m_{ss} \quad (7)$$

Determinar la masa seca y masa de agua de un sólido húmedo es indispensable antes de comenzar el secado, mediante un tratamiento térmico. En México existe un procedimiento establecido por la NOM-116-SSA1-1994 [17] para la determinar el contenido de humedad de alimentos. El cual se expresa en porcentaje, para base húmeda o base seca.

- **Contenido de humedad, en base húmeda:** Es la masa de agua presente en el producto por unidad de masa del sólido húmedo, se muestra en la ecuación (8):

$$M_{bh} = \left(\frac{m_{acs}}{m_{sh}} \right) \times 100 = \left(\frac{m_{acs}}{m_{acs} + m_{ss}} \right) \times 100 \quad (8)$$

- **Contenido de humedad, base seca:** Es la masa del agua presente en el producto por unidad de masa de material seco, como se presenta en la ecuación (9)

$$M_{bs} = \left(\frac{m_{acs}}{m_{ss}} \right) \times 100 \quad (9)$$

En investigación e ingeniería se utiliza con mayor frecuencia el término de contenido de humedad en base seca debido a que el cambio en peso asociado con cada punto porcentual en la reducción de humedad es constante. Mientras que el término de contenido de humedad en base húmeda se refiere a la cantidad de agua involucrada en la reducción de humedad de un porcentaje que varía con el progreso del secado, debido a que el peso del agua y el peso total del producto cambian. A partir de esta sección, M_{bs} es indicado como M .

2.3.1 Contenido de humedad en equilibrio

Un sólido húmedo sometido a secado, no está totalmente deshidratado, debido a que existe una porción de agua que no puede ser separada del sólido. Este remanente de agua en el sólido se denomina como contenido de humedad de equilibrio M_e , también es conocido como “agua ligada” [13]. Se alcanza cuando la presión de vapor en el producto se iguala con la presión de vapor en el aire, evitando que el aire adsorba humedad procedente del sólido.

El valor correspondiente de la humedad relativa del aire en el cual se logra la igualdad de presiones entre el sólido y el aire, se llama humedad relativa de equilibrio HR_e [14]. En la industria alimenticia con frecuencia se le denomina como “actividad de agua (A_w)” y se presenta de manera decimal como se muestra en la ecuación (10).

$$A_{H_2O} = \frac{HR_e}{100} \quad (10)$$

Valores altos de la actividad del agua favorecen el crecimiento de microorganismos como bacterias, hongos (mohos y levaduras), protozoarios e insectos [18]. Se utiliza como un estándar de la calidad, estabilidad y seguridad de los alimentos [12]. Indicando la unión del agua ligada con el producto, la cual se clasifica en tres rangos:

- El agua fuertemente ligada tiene valores de A_w entre 0.2-0.3 o inferior. Se refiere al agua unida al producto en forma monomolecular debido a la polarización de las moléculas favoreciendo la formación de hidroxilos (OH).
- El agua moderadamente ligada presenta valores de A_w entre 0.3-0.7. Corresponde a las moléculas de agua fijadas sobre el agua fuertemente ligada. La unión ocurre por ionización formando un medio acuoso.
- El agua poco ligada correspondiente a un valor de A_w entre 0.7-0.8 y superior. Es el agua incorporada al alimento por tensión osmótica y superficial. El agua poco ligada es la principal responsable de cualquier tipo de reacción enzimática favoreciendo el crecimiento microbiano.

2.3.2. Propiedades de sorción de humedad

La relación que existe entre la humedad relativa HR , la temperatura T_a y el contenido de humedad del producto en equilibrio M_e , es determinada por las propiedades de sorción del sólido húmedo. Se representan mediante diagramas que contienen dos líneas que representan un proceso de adsorción y un proceso de desorción, llamados isothermas.

En las cuales se determina el contenido de humedad en equilibrio de un producto expuesto al aire a diferentes condiciones de humedad relativa pero la misma temperatura. E indican que a mayor humedad relativa, mayor es el contenido de humedad que puede alcanzar el producto, como se observa en la Figura 3. El

desfasamiento entre la línea de adsorción y la de desorción se conoce como histéresis.

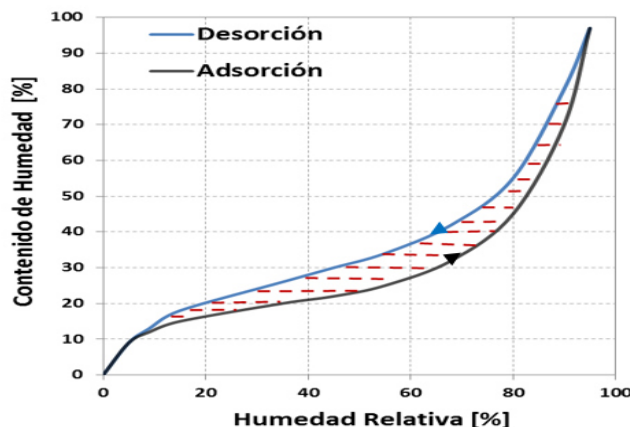


Figura 3.- Diagrama típico de isothermas de sorción

Cuando un producto se humedece como consecuencia de la exposición del sólido al aire a una temperatura específica se obtiene una isoterma de adsorción. En cambio si el producto se seca o deshidrata, disminuye el contenido de humedad, y se obtiene una isoterma de desorción. Conocer estas propiedades de los alimentos es esencial para el diseño y evaluación del secado por convección y el almacenamiento de productos agrícolas.

Los isothermas de sorción se determinan por diversos métodos, los más comunes son los siguientes; gravimétrico, manométrico e higrométrico [18].

- El método gravimétrico es el más común e involucra, el cambio de peso de la muestra a diferentes presiones de vapor de agua.
- El método manométrico utiliza manómetros de alta sensibilidad para medir la presión de vapor de agua en equilibrio con el producto alimenticio.
- Por último el método higrométrico mide la humedad relativa del aire que rodea el material alimenticio [19].

2.3.3 Modelos de sorción

Existe un extenso número de modelos matemáticos, teóricos, semi - teóricos y empíricos, reportados en la literatura abierta, utilizados para predecir las isotermas de sorción. El trabajo de Chirife e Iglesias es uno de los más extensos quienes revisaron 23 ecuaciones de isotermas experimentales y teóricas para alimentos [20]. Cada uno de estos modelos puede ser el más adecuado para describir las isotermas de sorción según las características de cada alimento.

Los modelos más utilizados en la literatura, son los modelos de Chung Pfof modificado, Henderson modificado, Halsey modificado y Oswin modificado. Han sido adoptados y recomendados por la “American Society of Agricultural Engineers (ASAE)” [21]. Existe un modelo de sorción reportado por Kaleemullah [22], el cual no ha sido adoptado por la ASAE. Sin embargo cuenta con características que le permiten adecuarse a otros productos si es validado y ajustado. Bajo distintas condiciones de temperatura y humedad relativa, estos modelos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.- Modelos de isotermas de equilibrio

<i>Nombre del modelo</i>	<i>Ecuación</i>
Modelo de Chung Pfof modificado	$M_e = \left\{ \left(\frac{1}{-f} \right) * \ln \left[\ln(HR) * \left(\frac{T_a + g}{-e} \right) \right] \right\}$
Modelo de Henderson modificado	$M_e = \{ \ln(1 - HR) * [-e * (T_a * f)]^{-1} \}^{1/g}$
Modelo de Oswin modificado	$M_e = \left[(e + f * T_a) * \left(\frac{1}{HR} + 1 \right)^{-(1/g)} \right]$
Modelo de Halsey modificado	$M_e = \{ [\exp(e - f * T_a)] * [-\ln(HR)]^{-1} \}^{1/g}$
Modelo de Kaleemullah	$M_e = \left[\ln \left(\frac{HR - e}{-f} \right) * (-g * T_a)^{-1} \right]^{1/h}$

M. Seid y O. Hensel [12] hacen una evaluación de los modelos de isothermas de sorción para el chile de la especie *Capsicum annum* bajo las temperaturas de 30°C, 50°C y 70°C y un rango de humedad relativa entre 10% y 90%. Los modelos de predicción de isothermas fueron Henderson, Halsey modificado y Oswin. Las muestras utilizadas para hacer la evaluación en la desorción tenían un peso de 3 gramos y para la adsorción de 6 gramos y se llevó de manera anaerobia, dentro de un secador de cabina. Se encontró que el modelo de Halsey modificado tiene mejor ajuste para predecir isothermas de chile dentro del rango de humedad relativa mencionado, el peor modelo fue el de Henderson.

Kaleemullah y Kailappan [22] determinaron el contenido de humedad en equilibrio para el chile rojo mediante una comparación de diez modelos para la predicción de isothermas a 25°C, 35°C y 45°C y humedad relativa de 11.5% a 86.5% de humedad relativa donde propone un modelo propio con cuatro constantes (e, f, g, h). Para proveer condiciones de humedad relativa se utilizaron varias soluciones salinas como cloruro de litio de acetato de potación, cloruro de magnesio, cloruro de sodio, sulfato de amonio, y cromato de potasio. Los pesos iniciales fueron de 10 gramos y 5 gramos para desorción y adsorción respectivamente. Las conclusiones encontradas son que la humedad relativa de equilibrio de chile se puede predecir, utilizando los modelos de Halsey modificado, Oswin modificado y Kaleemullah tanto en la adsorción como en la desorción. El modelo de Kaleemullah tiene el mejor ajuste.

Arabhosseini [23] publicó un estudio donde evalúa modelos de predicción de isothermas de sorción para alfalfa. En un rango de humedad relativa entre 5% a 90% y temperaturas de 25°C a 70°C. Las muestras de las hojas de alfalfa tenían un peso promedio de 8 gramos a 10 gramos y un contenido de humedad de 10% bh aproximadamente. Se utilizó una solución salina para mantener las condiciones de humedad relativa. Determinando el modelo de Halsey modificado como el más relevante, para la estimación de desorción de alfalfa.

Iguaz y Vírveda [24] obtuvieron isothermas de desorción para arroz con cascara y evaluaron cuatro modelos de predicción de isothermas. Los modelos fueron evaluados en un rango de temperaturas de 40°C a 80°C, dentro de un rango de humedad relativa de 14% a 90%. Las muestras tenían un contenido de humedad de 19% bs y se deshidrataron hasta alcanzar un valor de 7% bs. Se utilizó ácido sulfúrico a diferentes condiciones para mantener las condiciones de humedad relativa dentro del desecador. Concluyeron que los modelos de Chung Pfof modificado y de Henderson modificado son los más adecuados para la predicción de isoterma de desorción de arroz con cascara, expuesto al aire con alta temperatura.

Akubuo [21] identificó el modelo de Oswin modificado como uno de los más adecuados para la predicción de secado de batata en un rango de temperaturas de 5°C a 50°C. Con diferentes valores de humedad relativa, condiciones dada por una solución salina. Las pruebas se realizaron en un secador en lotes de 5 kilogramos y se secaron con aire caliente.

Aviara y Ajibola [25] ajustaron los modelos propuestos por la ASAE para determinar las isothermas de sorción de frijol de soya en un rango de temperatura de 40°C a 70°C y humedades relativas entre 7% y 98%. Para determinar la adsorción, la soya cuyo contenido de humedad inicial era de 7.7% bs fue mojada durante ocho horas hasta alcanzar un contenido de humedad de 38%.bs En el caso de la desorción el contenido de humedad inicial fue de 28.68%bs y disminuyó hasta 8.52%bs. Los resultados demuestran que los modelos de la ASAE son adecuados para predecir isothermas de sorción. Siendo el modelo de Oswin modificado el que muestra una mayor aproximación a los datos experimentales, seguido del modelo de Halsey.

2.4 Transferencia de calor

En el proceso de secado por convección, la transferencia de calor ocurre como consecuencia de un gradiente de temperatura entre un fluido y el sólido. El calor fluye del cuerpo de mayor temperatura hacia el de menor temperatura. Durante la deshidratación, el aire caliente interacciona con el sólido húmedo transfiriendo calor por convección, hasta que la humedad contenida en forma líquida se evapora. La cantidad de calor que el aire proporciona al proceso se determina a partir de un balance de energía.

Para este estudio, se considera el secador como un sistema cerrado y adiabático por lo tanto no se genera trabajo y tampoco existen pérdidas de calor a través de la frontera como se muestra en la Figura 4. En el cual se introduce aire caliente que al entrar en contacto con el sólido húmedo pierde calor, reduciendo su temperatura.

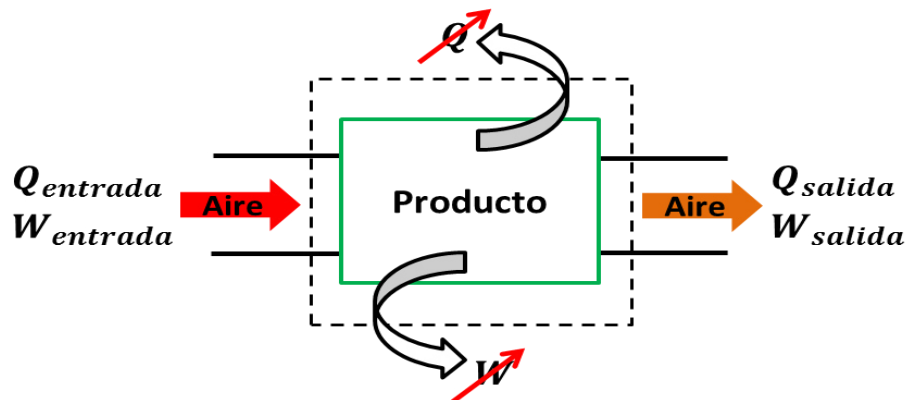


Figura 4.- Esquema de entrada y salida de energía para un secador adiabático

La interacción del aire con el sólido dentro del equipo provoca cambios de energía cinética, potencial e interna en el fluido. Estos cambios añaden al calor y trabajo de

flujo del aire en la salida, entonces el balance de energía puede escribirse como se expresa en (11):

$$Q_{entrada} - W_{entrada} = -Q_{salida} + W_{salida} + \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U \quad (11)$$

Los cambios de energía cinética y potencial son tan pequeños que se consideran despreciables en el balance. Juntando términos semejantes la ecuación (11) se describe como (12):

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W \quad (12)$$

Por otra parte la cantidad de energía que un fluido como el aire, puede transferir hacia otro cuerpo se conoce como entalpía H . Que es la suma del cambio de energía interna y el trabajo de flujo del aire producto de una expansión.

El cambio de trabajo, es la suma del producto de la presión por el cambio de volumen más el producto del volumen por el cambio de presión. En un secador el calor suministrado por el aire será igual a la entalpía del fluido, por lo que la ecuación (12) se puede expresar como (13).

$$\Delta Q = \Delta H = \Delta U + P_{atm} \Delta v + v \Delta P_{atm} \quad (13)$$

El secado ocurre en un volumen de control a presión constante, entonces se desprecia el trabajo producido por el cambio de presión. Llegando a la expresión (14)

$$\Delta H = \Delta Q = \Delta U + P_{atm} \Delta v \quad (14)$$

La transferencia de calor de un fluido a un sistema termodinámico a presión o volumen se determina como el producto del calor específico del fluido por la masa y el incremento de temperatura (15).

$$\Delta Q = C p_a m_{ah} \Delta T_a \quad (15)$$

Entonces la tasa de calor se determina según la expresión (16):

$$\dot{Q}_a = C p_a \dot{m}_{ah} \Delta T_a \quad (16)$$

2.5. Transferencia de masa

La transferencia de masa ocurre como consecuencia de la migración de humedad desde el sólido hacia el aire. Por efecto de un gradiente de concentración de humedad, entre el sólido húmedo y el aire, se genera el flujo de masa llamado difusión.

La difusión de masa en un medio isotrópico (medio donde las propiedades se mantienen constantes) se puede describir mediante la primera ley de Fick. La cual establece que la rapidez del flujo de masa a través de una superficie j es directamente proporcional al producto de una constante conocida como difusividad D y el gradiente de concentración [26].

La difusión de masa j con dirección en el eje X a través de la unidad de área del plano YZ en un eje de coordenadas cartesianas se expresa mediante la ecuación (17):

$$j_x = -D \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (17)$$

Sin embargo la mayoría de las situaciones prácticas la difusión de masa ocurre en un medio anisotrópico (donde las propiedades del sistema no son constantes). Por lo que la rapidez del flujo de masa varía con el tiempo generando una acumulación o agotamiento de materia dentro de un sistema.

La segunda ley de Fick se utiliza para describir la transferencia de masa en un medio anisotrópico, generalmente de sólidos [27]. Establece que la velocidad del cambio de concentración, es igual a la constante de difusión por la velocidad del cambio de gradiente de concentración. Para derivar la ecuación que describe el comportamiento de la segunda ley de Fick se requiere conocer la primera y realizar un balance de materia en un volumen definido.

Para este caso considere un paralelepípedo rectangular cuyos lados son paralelos al eje de coordenadas y con aristas de longitud de $2dx$, $2dy$ y $2dz$ respectivamente, con el origen en el punto $P(x, y, z)$ como se muestra en la Figura 5.

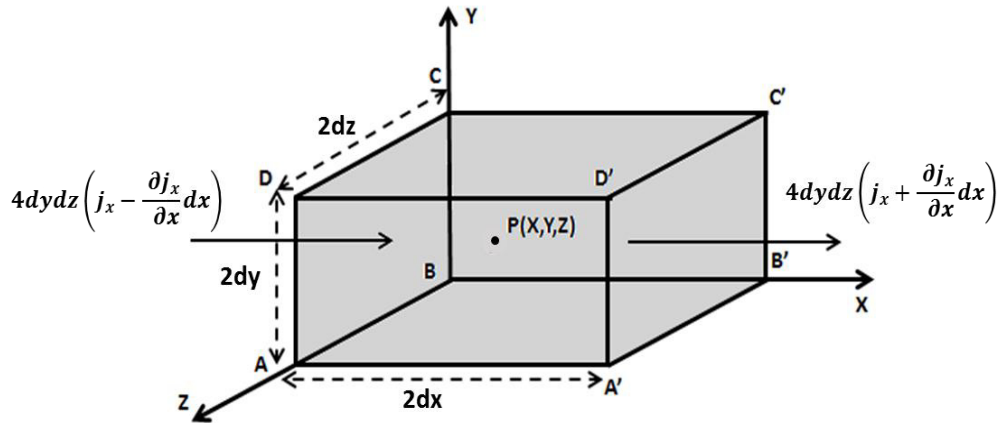


Figura 5.-Flujo de masa en un paralelepípedo

En el paralelepípedo la rapidez del flujo de masa que entra al elemento a través de las superficie $ABCD$ en plano $x - dx$ esta dado por la ecuación (18) :

$$4dydz \left(j_x - \frac{\partial j_x}{\partial x} dx \right) \quad (18)$$

La rapidez de flujo de masa que sale del paralelepípedo a través del plano $A'B'C'D'$ que se muestra en la Figura 5 se determina por la ecuación (19)

$$4dydz \left(j_x + \frac{\partial j_x}{\partial x} dx \right) \quad (19)$$

El cambio de la rapidez del flujo de masa, dentro del volumen finito a través de las superficies $ABCD$ y $A'B'C'D'$, en el eje x , se expresa como en (20):

$$\left(4dydz\left(j_x - \frac{\partial j_x}{\partial x}dx\right)\right) - \left(4dydz\left(j_x + \frac{\partial j_x}{\partial x}dx\right)\right) = -8dxdydz\left(\frac{\partial j_x}{\partial x}\right) \quad (20)$$

De manera similar se pueden encontrar un cambio de difusión en los ejes y , z a través de los planos correspondientes, los cuales se muestran respectivamente en (21) y (22):

$$-8dxdydz\left(\frac{\partial j_y}{\partial y}\right) \quad (21)$$

$$-8dxdydz\left(\frac{\partial j_z}{\partial z}\right) \quad (22)$$

Asimismo en un medio anisótropo, existe un incremento de concentración debido a la acumulación masa proporcional al volumen del paralelepípedo ($8dxdydz$) en un instante de tiempo t , expresado por (23)

$$8dxdydz\left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right) \quad (23)$$

Si las ecuaciones (20), (21), (22) y (23) se suman y posteriormente se dividen entre el volumen del paralelepípedo ($8dxdydz$) y se igualan a cero, obteniendo (24):

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right) - \left(\frac{\partial j_x}{\partial x}\right) - \left(\frac{\partial j_y}{\partial y}\right) - \left(\frac{\partial j_z}{\partial z}\right) = 0 \quad (24)$$

Despejando el término del incremento de concentración de la ecuación (24), se sustituye el valor de F dado en la ecuación (17) para cada eje del sistema de coordenadas y se considera la constante de difusión D constante, se obtiene la ecuación (25) :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -D\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2}\right) = -D\nabla^2 \phi \quad (25)$$

La ecuación (25) describe la segunda ley de Fick, la cual establece que la tasa de incremento de difusión de masa de un sistema termodinámico es igual al coeficiente de difusión por la tasa de incremento del gradiente de concentración.

El operador nabla (∇) en la ecuación (25) indica el campo vectorial en el que se hace el balance de masa. Por lo tanto puede ser utilizado para las coordenadas cartesianas, cilíndricas y esféricas de forma tridimensional bidimensional y unidimensional. Considerando que la transferencia de masa en dirección del eje x la ecuación (25) se puede simplificar como (26):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -D \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) \quad (26)$$

La ecuación (26) es de tipo diferencial de segundo orden cuya solución puede ser encontrada utilizando el método de separación de variables. El cual consiste en suponer que la concentración es función de dos variables (27):

$$\phi = X_{(x)} \theta_{(t)} \quad (27)$$

Donde X y θ son funciones de x y t respectivamente si se sustituyen en la ecuación (26) y se hace un acomodo de las variables se puede reescribir como (28):

$$\frac{1}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{D}{X} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \right) \quad (28)$$

La ecuación (28) se resuelve por el método de separación de variables en el cual se iguala a una constante, la cual por conveniencia se toma como $-\lambda^2$, multiplica al coeficiente de difusión D y se obtiene (29) y (30):

$$\frac{D}{X} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \right) = -\lambda^2 D \quad (29)$$

$$\frac{1}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\lambda^2 D \quad (30)$$

La solución de las ecuaciones (29) y (30) para encontrar X y θ son las siguientes:

$$X = (\alpha \sin(\lambda x) + \beta \cos(\lambda x)) \quad (31)$$

$$\theta = \exp^{-\lambda^2 Dt} \quad (32)$$

Sustituyendo las soluciones (31) y (32) en la ecuación (27) y tomando en cuenta que la concentración ϕ , en un proceso de secado representa el contenido de humedad M de un sólido. Se obtiene la ecuación (33)

$$M = (\alpha \sin(\lambda x) + \beta \cos(\lambda x)) \exp(-\lambda^2 Dt) \quad (33)$$

Donde α y β son constantes de integración. En la ecuación (33) se observa que la solución es de forma lineal y tiene más de una solución. Aplicando el principio de superposición la ecuación (33), se puede expresar como (34):

$$M = \sum_{n=1}^{\infty} (\alpha_n \sin(\lambda_n x) + \beta_n \cos(\lambda_n x)) \exp(-\lambda_n^2 Dt) \quad (34)$$

En la ecuación (34) los valores de las constantes α_n , β_n y λ_n se determinan mediante condiciones iniciales y de frontera para un problema en particular. En el caso de una placa plana con un espesor l , la condición inicial es la expresión (35) y las dos condiciones de frontera son las expresiones (36) y (37) :

$$t = 0 \quad 0 < x < l \quad M = M_0 \quad (35)$$

$$t > 0 \quad x = l \quad M = M_e \quad (36)$$

$$t > 0 \quad x = 0 \quad \frac{\partial M}{\partial t} = 0 \quad (37)$$

Estas condiciones frontera requieren que $\beta = 0$ y $\lambda = nx/l$. Esto permite encontrar los valores de α_n , de la ecuación (34), y llegar a una solución de la ecuación (26). Se obtiene la solución analítica de la ecuación de difusión de humedad MR en forma unidireccional, de una placa plana con espesor l en ecuación (38):

$$MR = \frac{M_n - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4l^2} \right] \quad (38)$$

2.5.1 Modelos de tasa secado

En la práctica es difícil ajustar los parámetros que determinan la tasa de secado de los productos agrícolas utilizando las leyes de Fick. Puesto que el lugar y clima donde se cosecha un tipo de hortaliza, provoca variación en el contenido de humedad y componentes volátiles que influyen en las propiedades organolépticas. Además existe una extensa variedad de tamaños y estructura interna de los productos hortícolas. Lo cual ha llevado al desarrollo de modelos empíricos, teóricos y semi-teóricos, para determinar la tasa de secado.

Los modelos teóricos son derivados de la segunda ley de Fick y consideran únicamente restricciones en, la resistencia a la transferencia de humedad para el estudio de secado [28]. Los modelos semi-teóricos y experimentales, son derivados de la simplificación de la solución de la segunda ley de Fick y validados considerando condiciones externas como temperatura, humedad relativa y la velocidad del aire [29]. El desarrollo de estos modelos consiste en hacer circular un flujo de aire a través de un producto húmedo, durante un periodo de tiempo determinado. Considerando el sólido como un volumen de control y manteniendo las mismas condiciones del aire durante el proceso. Con este arreglo se determina la razón entre un contenido de humedad inicial y final. Este proceso se denomina secado en capa fina, del cual se muestra un diagrama en la Figura 6.

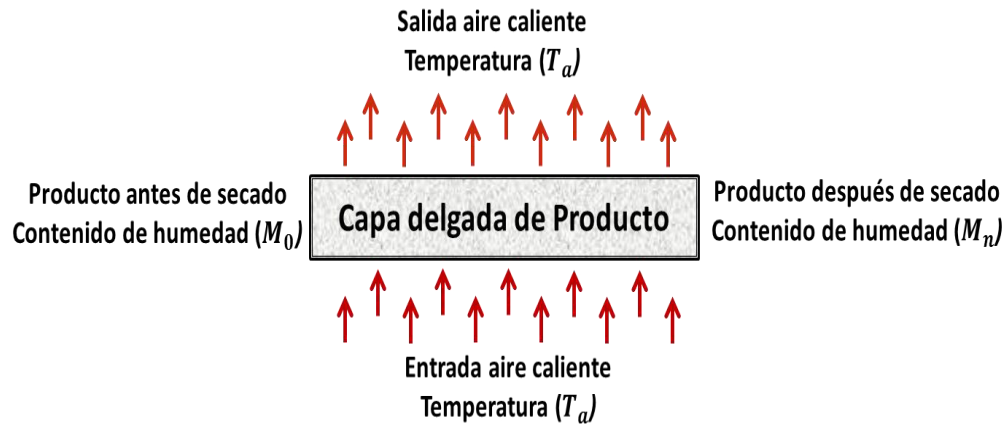


Figura 6.- Modelos de secado en capa final

Existen diversos modelos de relación de contenido de humedad en la literatura abierta, los más importantes se muestran en la Tabla 2. Siendo el modelo de Page es el más aplicado y utilizado en la simulación de procesos de secado de frutas y verduras [18].

Tabla 2.- Modelos de tasa de secado.

<i>Nombre del modelo</i>	<i>Ecuación</i>
Modelos de Newton	$MR = \exp(-(k \Delta t))$
Modelo de Page	$MR = \exp(-(k \Delta t))^m$
Modelos de Henderson y Pabis	$MR = a * \exp(-k \Delta t)$
Modelo Logarítmico	$MR = a * \exp(-k \Delta t) + c$
Modelos de Midilli y Kucuk	$MR = a \exp(-k \Delta t^n) + b \Delta t$
Modelo de Kaleemullah	$MR = \exp(-(aT_e + b)\Delta t^{(cT_e + d)})$

Con excepción del modelo de Kaleemullah que cuenta con 4 constantes, los modelos de secado, mostrados en la Tabla 2 tienen en común una constante k , que describe un coeficiente de transferencia de masa. Representa la cantidad de

masa transferida de una fase a la otra en la unidad de superficie de contacto entre las fases sólido y vapor. Esta constante k , se determina con correlaciones empíricas que involucran la temperatura, como variable. Las constantes de los modelos de cinética de secado al igual que los modelos de sorción deben ser ajustadas y validadas mediante métodos estadísticos, para aplicarlos a otras condiciones o extrapolarse a otros productos.

En la actualidad estos modelos son ampliamente estudiados, puesto que proporcionan el cambio de contenido de humedad en función del tiempo, de una manera práctica rápida y sencilla. A continuación se discuten algunos estudios realizados por distintos autores sobre los modelos de cinética de secado.

Blaise y Ferdinand, estudiaron el comportamiento del secado de tres productos tropicales: 1) mandioca, 2) mango y 3) plátano [30]. Asimismo evalúan siete modelos de secado como los modelos de Newton, Page y el modelo de Henderson y Pabis. Los experimentos se realizaron en un secador solar de tipo túnel. La temperatura del aire dentro del túnel de secado fue de 60°C y no se reporta la humedad del aire. Los autores concluyeron que el modelo de Henderson y Pabis tiene mayor validez para describir la tasa de secado de los tres productos estudiados.

Tunde y Akintunde en [31], evaluaron tres modelos de secado 1) Newton, 2) Page y 3) logarítmico, para predecir el secado de chile de la especie *Capsicum frutescens*. Los experimentos se realizaron utilizando un secador solar que consiste en un colector solar y una cámara de tipo cabina. La temperatura del aire dentro de la cámara fue de 45°C y no se presentan datos de la humedad relativa. El contenido de humedad inicial reportado es 300% bs y descendió hasta un contenido de humedad en equilibrio de 9% bs. La velocidad del aire se mantuvo entre 1 y 2 m/s. Los modelos evaluados tienen buenos resultados, sin embargo el modelo de Page muestra mejor ajuste para predecir el secado de chile.

Doymaz [29] estudio la tasa de secado del chile pimiento rojo, comparando 11 modelos diferentes. El secador utilizado consiste en una cámara de secado, soplador, calentador e instrumentación. Para realizar los experimentos se

utilizaron rebanadas del fruto que tenían en promedio 2 cm de largo y 2 cm de ancho, bajo diferentes condiciones de temperatura: 55°C 60°C y 70°C. La velocidad del aire es de 1.5 m/s en todos los casos. Al final de los experimentos se alcanzó un contenido de humedad de 10% bh. Se concluye que los modelos estudiados, pueden ser utilizados para predecir el secado de esta hortaliza. Entre los que se encuentran los modelos de Newton, Page, Logarítmico y el modelo de Henderson y Pabis.

Akpinar y Bicer [9] determinaron que el modelo logarítmico es adecuado para describir la deshidratación de la mora blanca (*Morus alba* L.). El modelo se validó y se comparó con otros cinco modelos. Las muestras fueron sumergidas en una solución de oleato de etilo y colocadas dentro de un secador de tipo túnel de las siguientes dimensiones 0.54 m x 1.4 m x 1.02 m.

Las charolas de soporte tenían un área de 0.3 m x 0.3 m. Los experimentos se realizaron a condiciones de temperatura de 50°C y una velocidad de aire 1.0 m/s. La muestra de mora utilizadas para el secado, inicialmente tenían un peso de 200 gramos, con un contenido de humedad inicial de 81.5 % bh. Fueron deshidratadas hasta alcanzar un contenido de humedad de 17% bh en un tiempo de 36 horas.

Midilli y Kucuk [28], evaluaron ocho modelos matemáticos para describir el secado de pistache con cáscara y sin cáscara en capa fina, por convección forzada y natural, en un secador solar. El secador solar es de tipo cabina, consiste en bandejas en su interior, con un colector de aire solar, un calentador auxiliar de aire y un soplador. Durante los experimentos de secado el aire del ambiente tenía una temperatura en un rango de 21°C a 32°C y humedad relativa de 60% a 75%, mientras que la temperatura del aire de secado de 32°C a 81°C y humedad relativa del 37% a 62%. En el secado de capa fina por convección forzada, la cinética de secado disminuyó hasta 2.9% para pistache sin cáscara. El secado de capa fina con convección natural, la tasa de secado para pistache con cáscara disminuyó hasta 9.2% y para pistache sin cáscara la cinética de secado hasta 7.6%. De los modelos evaluados se concluyó que el modelo logarítmico de secado, describe de mejor manera el secado de capa fina forzada para pistache con cascara y sin cascara.

Aghbashlo [32], estudiaron las características de secado en forma continua de rebanadas de papa, evaluando tres modelos para describir la curva de secado. El proceso utilizó, un secador de banda en el cual se colocaron 250 gramos de papa rebanada finamente. Las muestras tenían un espesor de 5mm con un contenido de humedad inicial de 362% bs, los experimentos se realizaron a temperaturas de 50°C, 60°C, 70 °C y las velocidades del aire fueron de 0.5 m/s, 1 m/s y 1.5 m/s. El contenido de humedad que se alcanzo fue entre 12% y 1% en bs. Evaluaron tres modelos de secado de los cuales concluyen que el modelo de Page, es un modelo semi-teórico adecuado para la predicción de la tasa de secado de papa.

Akpınar [33] evaluó 13 modelos de secado para rebanadas de papa, manzana y calabaza. Utilizando un secador de tipo ciclón, el cual consiste en un cilindro con dos charolas internas, un soplador y un calentador de aire. Los experimentos fueron realizados a 60, 70, 80 °C a velocidades de 1 y 1.5 m/s. Entre los modelos evaluados, el modelo de Newton y el modelo de Henderson y Pabis, resultan como los más adecuados para la predicción de papa y manzana respectivamente. Sin embargo el modelo de Midilli y Kucuk, tiene mejores resultados para todas las hortalizas evaluadas con diferentes condiciones de operación.

Kaleemullah [34] analizó las características de secado de chile rojo, utilizando un modelo empírico para describir la cinética de secado. El secador utilizado fue de tipo rotatorio. Consiste en un motor-soplador, cámara de calentamiento, cámara de distribución de aire, cámara de secado, bandejas e indicadores de temperatura. Los chile tenían un contenido de humedad inicial de 330% bs y fueron secados hasta alcanzar un contenido de humedad de 10.5% bs. Los experimentos se realizaron con aire a temperaturas de 50°C, 55°C, 60°C y 65 °C. De los modelos comparados destaca el modelo de Kaleemullah siendo el más conveniente al obtener mejor ajuste para describir el secado de chile rojo, seguido del modelo de Page.

2.6. Periodos del secado

En un proceso de secado, las características del sólido determinan la manera en la que la humedad se transfiere desde el interior hacia la superficie del mismo. Algunas de estas características son: el material, el tamaño, la porosidad y la higroscopia [35], y determinan la manera en que se unen el agua y el sólido que puede ser de la siguientes formas: químico, fisicoquímico, adsorción, osmótica, micro-capilar y macro-capilar [14]. Esta unión influye en la difusión y flujo capilar de humedad causado por agitación y gravedad, afectando la tasa de secado [36]. La tasa de secado también es afectada por condiciones externas como la temperatura, humedad, velocidad y dirección del agente de secado, asimismo la forma física del sólido y manera de soportar al sólido [7]. Debido a las condiciones internas y externas el comportamiento de la tasa de secado, se lleva a cabo en dos periodos; 1) periodo de tasa de secado constante y 2) periodo de tasa de secado decreciente.

2.6.1 Periodo de tasa de secado constante

El periodo de tasa de secado constante es la etapa inicial del proceso de secado, en la cual no existe transferencia de humedad. Comienza al calentar el sólido y finaliza cuando se comienza a evaporar la humedad contenida en la superficie del mismo. La evaporación ocurre según la intensidad de calor del agente de secado hasta generar una condición de saturación de vapor de agua en el sólido.

La intensidad de calor depende de las condiciones del aire, como la temperatura, humedad, velocidad y dirección del flujo. Estas condiciones externas del secado son de gran importancia durante la tasa de secado constante.

2.6.2 Periodo de tasa de secado decreciente.

Es la etapa final del secado, comienza con la evaporación y reducción de humedad la humedad en el sólido. En este periodo inicia la transferencia de humedad del sólido al aire, determinando una tasa de secado. Sin embargo la tasa de secado disminuye como consecuencia de la resistencia interna al transporte de

humedad, debido a condiciones internas como porosidad e higroscopia del sólido [37]. La disminución de la tasa de secado se conoce como periodo de secado decreciente.

En las Figura 7 (a), (b) y (c) se muestran curvas idealizadas comúnmente representativas del secado de sólidos porosos. En las cuales se muestra el cambio del contenido de humedad en función del tiempo Figura 7(a), el comportamiento de la tasa de secado en función del contenido de humedad Figura 7(b). Por último se muestra la tasa de secado en función del tiempo Figura 7(c). La sección de **AB** corresponde al calentamiento de los sólidos, la sección **BC** al periodo de tasa de secado constante. El punto **C**, indica el final del periodo de tasa de secado constante y el comienzo de la tasa de secado decreciente. A este punto se lo conoce como punto crítico de contenido humedad. La sección **CD** indica el periodo de velocidad de tasa de secado decreciente.

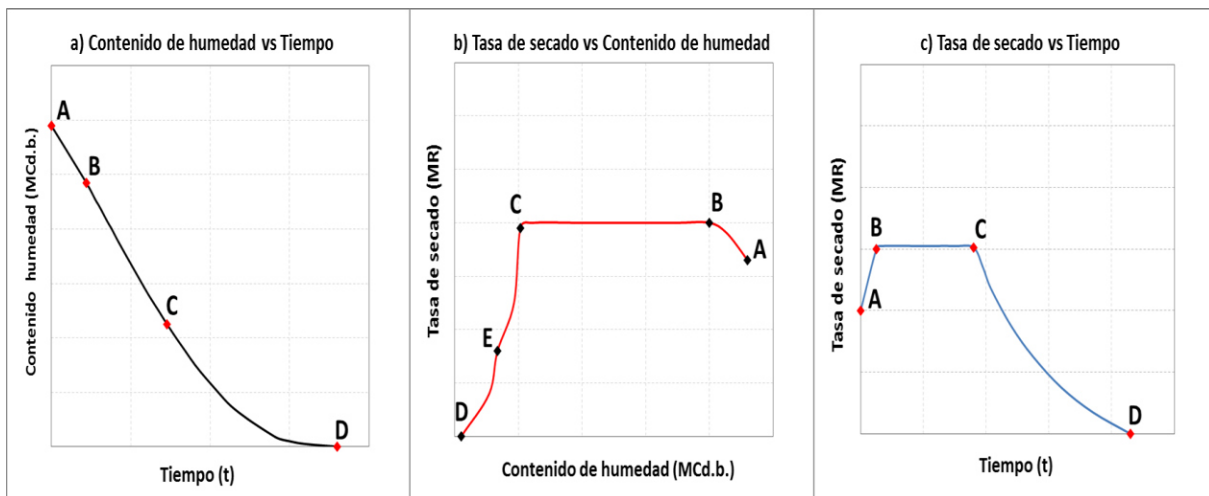


Figura 7.- Curvas de periodos del secado

Existen sólidos porosos que se someten a secado y dependiendo de su estructura se dice que tienen superficie saturada o insaturada dependiendo si en la superficie se encuentra o no presente el agua. El comportamiento del secado de sólidos porosos se muestra en la Figura 7(b). La sección **CD** (periodo decreciente) se divide en dos secciones la primera sección **CE** es la superficie insaturada, la segunda sección **ED** es la superficie saturada. Debido a su gran contenido de humedad en las hortalizas, es difícil encontrar una superficie insaturada dentro de

su estructura, además su calentamiento y el periodo de secado son muy cortos y no se consideran. Por lo tanto en el secado de hortalizas solo se aprecia el periodo decreciente (sección **CD**) en las Figura 7(a) y (b).

2.7 Equipos de secado

En los países en desarrollo, el secado de productos agrícolas sigue llevándose a cabo por exposición directa al sol, quedando el producto expuesto a las condiciones climáticas, polvo, insectos y microorganismos. Bajo estas condiciones el tiempo para alcanzar el contenido de humedad final puede llegar hasta los 15 días y las pérdidas pueden superar un 60% [38]. El proceso es lento, no uniforme y requiere mano de obra [9].

Para enfrentar estas dificultades los equipos y métodos de secado han evolucionado, conforme los requisitos de cada producto en específico y los avances tecnológicos. Hoy en día existe aproximadamente 100 tipos de equipos de secado disponibles en el mercado [7]. Los equipos comúnmente encontrados en la literatura son: Secador de tornillo transportador, turbosecador, secador de túnel, secador de tambor, secador rotatorio, secador de lecho fluidizado, secador de banda transportadora y secador de tipo charola y se describen a continuación.

Secador de tornillo transportador: Es un secadero continuo y está conformado básicamente de un transportador horizontal de tornillo sinfín que se encuentra dentro de una carcasa cilíndrica. El calentamiento puede ser con vapor o con resistencias eléctricas. Cuando se utiliza vapor para proveer calor hacia el secador, es necesario encamisar la carcasa del secador. La alimentación de sólidos se hace por un extremo y la descarga por el lado opuesto. La Figura 8 presenta un esquema de un secador de tornillo calentado por vapor.

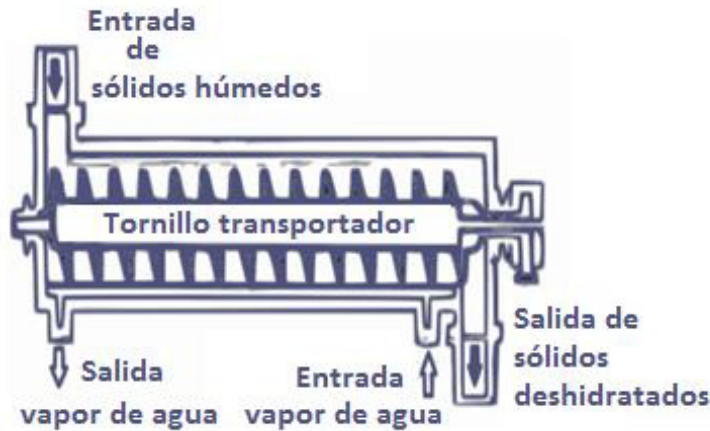


Figura 8.-Secador de tornillo transportador

Turbo secador: Consiste en un conjunto de charolas dispuestas unas encima de otras, sujetadas a un eje central rotatorio. En la parte interior del eje están instalados unos sopladores tipo turbina. Éstos hacen circular aire por una serie de calentadores, distribuidos a la altura de las charolas, formando diferentes zonas de secado y enfriamiento. El rango de velocidad de operación del aire es de 0,6 a 2,4 m/s [13].

Los sólidos se introducen sobre una bandeja superior expuesta a una corriente de aire caliente. Durante el proceso, los sólidos caen hacia la descarga, ubicada en la parte inferior del secador. En la Figura 9 se muestra esquemáticamente un turbosecador.

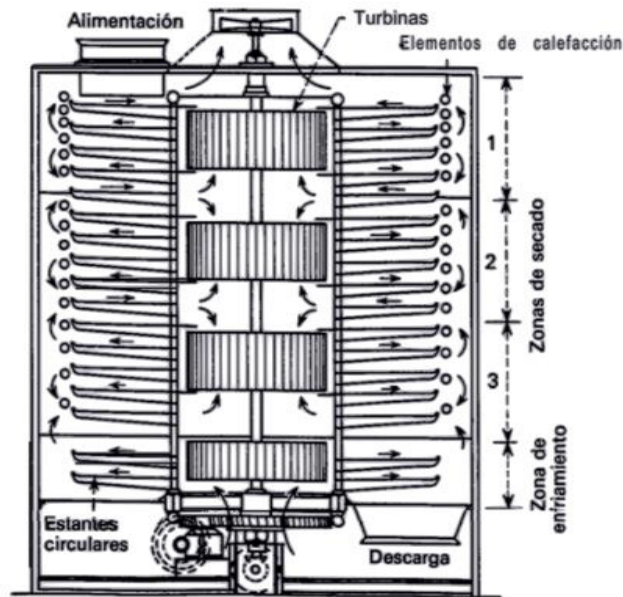


Figura 9.- Turbosecador [13].

El secador de tipo túnel: Se constituye con láminas de plástico (polietileno) o vidrio, sobre un soporte de madera o metal, que forma una cabina con geometría de prisma rectangular, triangular o por lo regular es un semicilindro. En su interior se colocan charolas, las cuales son distribuidas dentro del área del secador y apiladas para estibar un mayor número de charolas. Regularmente son montadas en carritos, para facilitar su movimiento. El túnel tiene dos puertas que funcionan como entrada y salida de producto y aire. Para los secadores solares, la fuente de calor es el sol y el material de cubierta que puede ser de plástico o vidrio, cuya función es aumentar la temperatura del aire generando un efecto invernadero. El consumo de energía es bajo principalmente en el secado de hortalizas a gran escala. Algunas limitaciones de los secadores de este tipo de secador son: área requerida, costos de mano de obra e infestación de insectos [39]. La Figura 10 muestra un secador de tipo túnel. Se observa que las charolas forman hileras dobles. En el centro del túnel hay una apertura que permite la salida de aire húmedo.

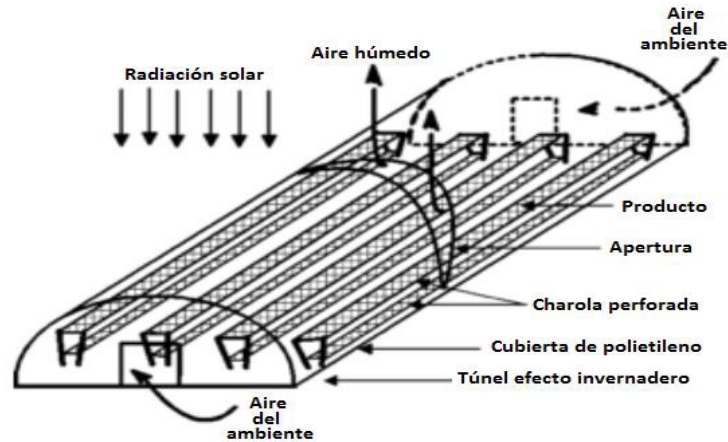


Figura 10.- Secador de túnel [40]

Secaderos de tambor: Consisten en uno o más rodillos metálicos que giran lentamente, cuya fuente de calor es a través de vapor que circula en el interior de los rodillos. Los rodillos suelen tener diámetros que van desde 0,6 hasta 3 m y una longitud de 0,6 hasta 4,3 m y operan entre 1 y 10 rpm. Estos equipos tienen una capacidad de secado proporcional al área efectiva del tambor comprendida entre 5 y $50 \frac{kg}{m^2 \cdot h}$ [13]. En los secadores de tambor se secan principalmente productos como talcos y purés [7] y se muestra un esquema en la Figura 11.

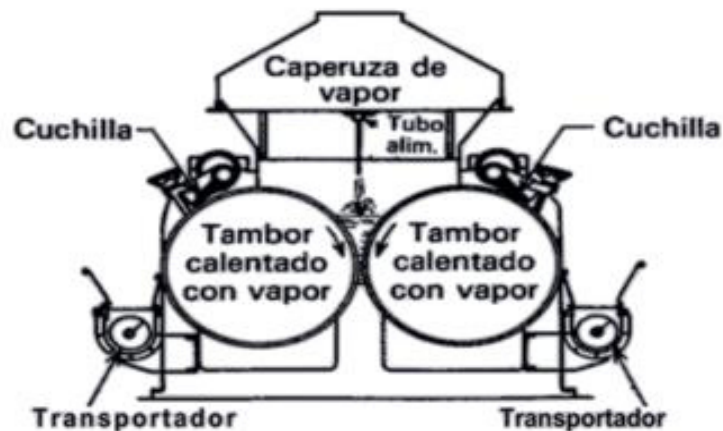


Figura 11.- Secador de tambor doble con calentamiento central [13]

Secador rotatorio: Básicamente consiste en un cilindro metálico, que se puede constituir de varias partes ensambladas y selladas. El cilindro es rotado de forma horizontal o inclinado hacia la descarga, utilizando acoplamientos mecánicos y un motor eléctrico. La entrada de sólidos se realiza por un extremo del cilindro y se transfiere con ayuda de unas espas ubicadas en el interior, hacia la zona de descarga. La Figura 12 muestra un secador de rotatorio.

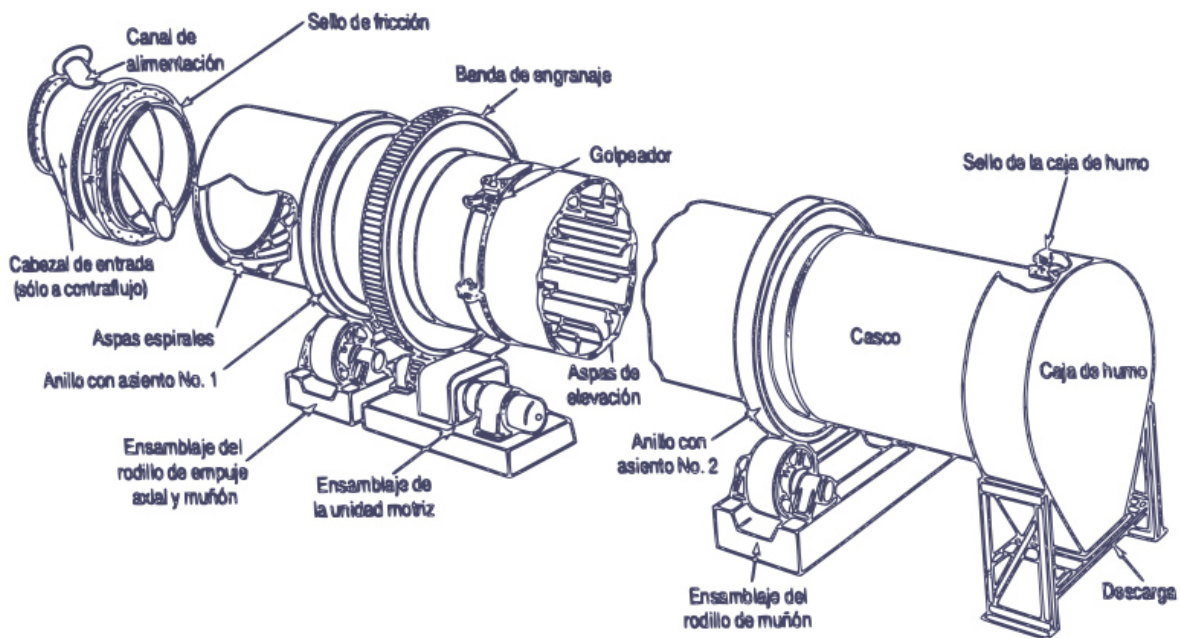


Figura 12.- Secador rotatorio [35]

Secador de lecho fluidizado: Consiste en un contenedor cilíndrico, con una entrada de sólidos húmedos y una entrada de aire caliente en la parte inferior, además de una salida de sólidos secos y otra de aire exhausto. Debido al amplio rango de temperatura de operación se utiliza en el secado de diversos productos, como suspensiones, soluciones, pastas disueltas y lodos. Las partículas son suspendidas en un gas y puede trabajar de forma continua o por lote. La limitación de este secador es que debe operar con partículas no mayores a 2 cm [41]. La Figura 13 muestra un esquema de un secador lecho fluidizado.

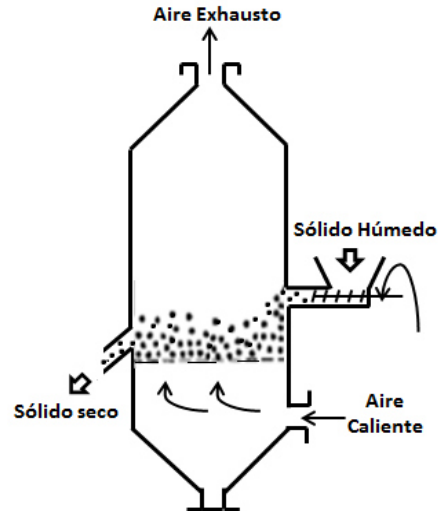


Figura 13.- Secado de lecho fluidizado [41]

Secador de banda transportadora: Consta de una malla metálica colocada sobre rodamientos, que pueden ser o no, accionados con motores eléctricos. Con extractores de humedad en la parte superior. El calor se suministra mediante resistencias eléctricas, gases de combustión, aire caliente o vapor. Se utiliza principalmente para el secado de pastas, harinas, frituras y frutas. En la Figura 14 representa un secador de este tipo.

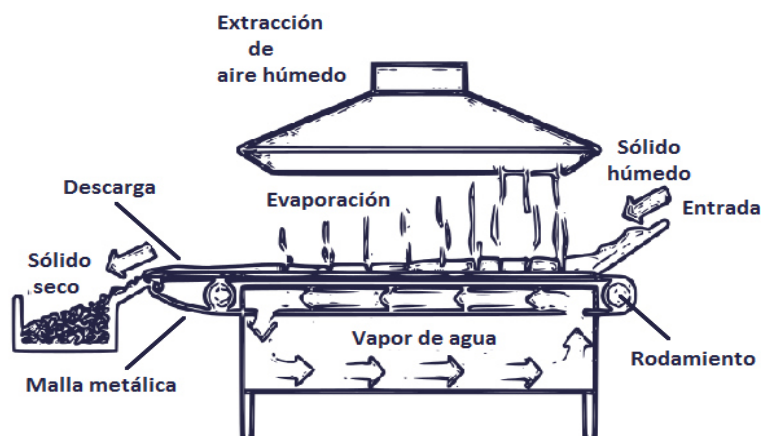


Figura 14.- Secador de banda transportadora, con calentamiento interno de vapor

Secador de tipo charola: Consta de un conjunto de charolas, situadas dentro de un recinto aislado, con sopladores de aire y un calentador, por el cual fluye aire que deshidrata un producto en específico. Generalmente opera por lotes y es el equipo más utilizado para secado de hortalizas [7]. El tamaño de un secador de charola dependerá principalmente de tres factores: 1) el número de charolas colocadas dentro del recinto, 2) el tamaño del lote (cantidad de producto) y 3) la densidad del producto fresco [42]. En algunos casos las charolas son desplazadas en diferentes direcciones, mediante mecanismo giratorios. En la Figura 15 muestra un secador de este tipo.

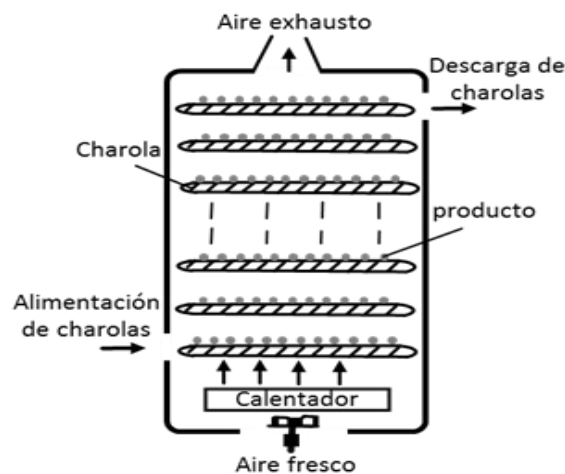


Figura 15.- Secador de tipo charola

Los equipos pueden ser operados con diferentes temperaturas y productos. Por lo que se pueden adecuar de diferentes maneras, para transferir calor hacia los productos y de reducir su contenido de humedad. Lo que conlleva a clasificarlos de distintos modos. En la literatura las clasificaciones más encontradas de los equipos de secado son: el modo de operación (continua, semi-continuo o por lote), la forma de transferencia de calor (conducción, convección y radiación) y el método de retirar agua de los productos (sublimación, osmosis, aire caliente, microondas, solar, secado lecho fluidizado, secado en tambor) [43].

2.7.1 Clasificación según la transferencia de calor

La clasificación según la transferencia de calor, permite conocer aspectos de diseño y el funcionamiento de cómo se lleva a cabo el calentamiento del sólido. Los principales mecanismos de transferencia de calor utilizados en el secado de productos agrícolas son la conducción y la convección.

La conducción se presenta cuando un sólido hace contacto directo con una superficie caliente. Los secadores dentro de esta categoría se denominan secadores indirectos, debido a que existe una barrera de retención (placa metálica) entre el medio de calentamiento y el producto. La velocidad de secado depende del área de contacto entre las superficies del material mojado y la barrera de retención de calor. Algunos de los equipos incluidos en esta clasificación son los secadores de tornillo transportador, tambor y de banda transportadora.

La transferencia de calor por convección, ocurre cuando se utilizan gases de combustión, o aire caliente para transferir calor hacia el sólido húmedo. Debido a que el aire hace contacto con el sólido húmedo, a los equipos que se encuentran dentro de esta categoría también se les conoce como secadores directos. La humedad del sólido es arrastrada por desorción por el aire. Los secadores encontrados en esta categoría son turbo secador, túnel, rotatorio, lecho fluidizado y de tipo charola.

Si la transferencia de calor se lleva a cabo sin la necesidad de utilizar un agente de secado o por el contacto directo entre la fuente de calor y el sólido húmedo, la transferencia de calor es por radiación. La transferencia de calor por radiación se logra mediante ondas electromagnéticas. La fuente de estas ondas puede ser la luz solar, lámparas infrarrojas, resistencias eléctricas y refractarios incandescentes calentados con gas. Su aplicación principal es el secado de pintura, recubrimientos de materiales y el secado de líquidos pastosos para obtención de polvos. Los procesos que utilizan este tipo de transferencia de calor también se conocen como secado por microondas.

2.7.2 Clasificación según el método de secado

La clasificación según los métodos de secado, se refiere a la manera de retirar humedad de un sólido y la fuente de energía que asiste el secado. Se reportan cerca de 11 métodos [7], entre los más utilizados en la industria alimenticia son los siguientes [44]: 1) secado por congelación, 2) secado por osmosis, 3) secado por aire caliente, 4) secado por microondas, 5) por combinación de los métodos antes mencionados. Todos estos métodos de secado requieren la aplicación de calor excepto el método de secado por congelación, debido a que la humedad del agua es retirada por sublimación. A continuación se hace una breve descripción de los métodos de secado más utilizados.

- **Secado por congelación:** Ciertos materiales biológicos, farmacéuticos, y alimenticios no se pueden calentar a temperaturas moderadas. Por lo que son sometidas a un proceso de liofilización, el cual consiste en deshidratar productos en dos etapas. La primera es una congelación rápida, la segunda en retirar el agua por medio de calentamiento en una cámara al vacío. Las ventajas de este método son: que el material no sufre tensión por reducir su volumen y la retención de los compuestos volátiles de sabor es mayor, preservando el sabor. Una sus desventajas es el costo de operación. Los equipos utilizados en este método de secado suelen ser cámaras de congelación.
- **Secado por osmosis:** El secado o deshidratación osmótica consiste en la eliminación de agua, al sumergir trozos de hortalizas en una solución hipertónica. Las soluciones hipertónicas son aquellas que en su composición tienen mayor concentración de soluto, por lo que cualquier tejido vegetal que se encuentre en dicha solución, comienza a deshidratarse [42]. Algunas ventajas del secado osmótico es que requiere poca cantidad de calor para llevar a cabo el proceso, dentro de las desventajas es que el daño físico-químico y biológico afecta fuertemente a los alimentos, principalmente en las propiedades organolépticas.

- **Secado por aire caliente:** Este método es el más utilizado para el secado de frutas y vegetales. Es el método de secado más simple y económico. Consiste en calentar el aire hasta cierta temperatura, el cual circula a través de un sólido. En el secado de hortalizas las temperaturas de operación no sobrepasan el punto de ebullición del agua y varía dependiendo el fruto o vegetal. La temperatura de operación máxima en el secado de alimentos es de 80°C [18]. Los equipos que se encuentran en esta clasificación son los mismos que se utilizan en el secado por convección.
- **Secado por microondas:** También conocido como secado por radiación. Ocurre cuando se inciden ondas electromagnéticas sobre un sólido húmedo generando calor [45]. Las ondas penetran el sólido con cierta profundidad, evaporando el contenido de humedad desde el interior [8]. Las ventajas de este método son la reducción del tiempo de secado, alta eficiencia energética y no requiere un agente de secado.

En la industria el método de secado más encontrado es el secado por convección de aire caliente. Más del 85% de los secadores industriales son de este tipo [4] y se utiliza principalmente para deshidratar productos con alto contenido de humedad como las hortalizas [34].

Capítulo 3. Metodología

3.1 Introducción

En el secado por convección forzada en deshidratadores de tipo túnel o por charolas intervienen fenómenos de transferencia de calor y masa. Este trabajo se toma como caso de estudio, el chile del género *Capsicum annum*. La producción de esta hortaliza es relevante en la zona norte y centro de México. En esta sección se describe como los fundamentos de estos fenómenos se relacionan y combinan para describir la operación de un secador bajo diferentes condiciones. La metodología que se desarrolla involucra los siguientes pasos.

- 1) Selección de los modelos de sorción y modelos de tasa de secado.
- 2) Desarrollar el modelo de simulación para un secador por etapas, utilizando balances de energía y masa, para determinar la disminución de temperatura e incremento de la humedad relativa del aire, siendo el gradiente de humedad un parámetro determinante en el proceso.
- 3) Implementación de un código de simulación para evaluar el proceso de secado por etapas de equilibrio.
- 4) Obtener una curva de operación para un deshidratador de tipo túnel por convección forzada de aire caliente.
- 5) Análisis de sensibilidad de las variables que intervienen en el proceso de secado, tales como la temperatura, humedad relativa, velocidad del aire, tiempo de residencia por etapa y configuración de la dirección de aire.
- 6) Evaluación de la importancia de la humedad relativa en la curva de operación de un secador de tipo túnel por convección forzada.

De los resultados obtenidos, se puede observar la importancia del gradiente de humedad, temperatura y velocidad del aire. El correcto aprovechamiento de los gradientes de concentración y temperatura lleva a un consumo reducido de energía para el proceso. La configuración en el flujo del aire en el deshidratador permite decidir un diseño de deshidratador eficiente y menor tiempo.

3.2 Selección de los modelos de sorción y de tasa de secado

Para llevar a cabo la selección de modelos de sorción mostrados en la Tabla 1 y de los modelos de tasa de secado de la Tabla 2, es necesario realizar un ajuste utilizando distintos criterios estadísticos. Los más empleados son los siguientes; la distribución de Pearson, la raíz del error cuadrático medio y el análisis de regresión no lineal y se describen a continuación. La distribución de Pearson o mejor conocida como chi- cuadrada (X^2), es una medida del ajuste, mide la distribución aleatoria entre valores experimentales de un fenómeno y valores obtenidos por un modelo matemático. Se encuentra mediante la ecuación (39):

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{pre,i} - M_{exp,i})^2}{N - Z} \quad (39)$$

La raíz del error cuadrático medio ($RMSE$), es un indicador que mide el promedio de los errores al cuadrado, entre los valores experimentales y predichos por un modelo establecido. La ecuación (40) permite calcular estas diferencia [46].

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (M_{pre,i} - M_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (40)$$

El análisis de regresión no lineal, indica la relación entre los valores experimentales y los que se predicen con un modelo y/o procedimiento. Mediante un coeficiente de determinación R^2 , ecuación (41):

$$R^2 = \frac{(N \sum_{i=1}^n M_{pre,i} * M_{exp,i} - \sum_{i=1}^n M_{pre,i} \sum_{i=1}^n M_{exp,i})^2}{N \left(\sum_{i=1}^n M_{pre,i}^2 - (\sum_{i=1}^n M_{pre,i})^2 \right) * N \left(\sum_{i=1}^n M_{exp,i}^2 - (\sum_{i=1}^n M_{exp,i})^2 \right)} \quad (41)$$

Para lograr una buena precisión y calidad de los modelos sintonizados con los datos experimentales, el valor de chi- cuadrada (X^2) y de la raíz del error cuadrático medio $RMSE$ debe ser cercano a cero, mientras que para el coeficiente de determinación R^2 debe ser más cercano a 1. Generalmente el método de análisis de regresión no lineal es el único que se considera para la validación de estos modelos [47]. En el presente estudio solo se consideraran el valor de R^2 y $RMSE$.

3.2.1 Selección del modelo de desorción

Se realizó un análisis de los modelos de isothermas de equilibrio reportados en la Tabla 1. Estos modelos se ajustaron y validaron con valores de sorción experimentales para chile rojo de la especie (*Capsicum annum*) reportados en [20], determinando R^2 , $RMSE$ y las constantes e , f , g y h para cada modelo. El análisis muestra que el modelo de sorción propuesto por Kaleemullah en [22] es el más indicado para ajustarse a los parámetros experimentales y se expresa en la ecuación (42):

$$M_e = \left[\frac{\ln \left(\frac{HR - 0.7872726}{-0.9462634} \right)}{-0.000499 * T_a} \right]^{1/1.62596} \quad (42)$$

3.2.2 Selección del modelo de tasa de secado

Los modelos de tasa de secado reportados en la Tabla 2, no se ajustaron de la misma manera que los modelos de sorción. Solo se empleó el modelo de Kaleemullah bajo el criterio que es un modelo semiempírico, utilizado para predecir la deshidratación en un equipo rotatorio (Figura 12). Donde el aire circunda sobre el sólido húmedo de una manera más uniforme teniendo una aproximación de un proceso de secado por convección. Por otro lado el resto de los modelos cuentan con una constante k , la cual depende de otras correlaciones.

Cabe mencionar que el modelo de Kaleemullah se ajustó para predecir el secado de otras hortalizas, para ver su aplicación con otros productos hortícolas, encontrando las constantes a, b, c , y d . La ecuación (43) muestra el valor de estas constantes adecuadas para determinar la tasa de secado para Chile.

$$MR = \frac{M_n - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-(0.00226T_a + 0.07219)\Delta t^{(-0.001808T_a + 1.411606)}) \quad (43)$$

3.3 Modelo de un secado por etapas

El secado de productos agrícolas se realiza exponiendo el producto en un flujo de aire caliente hasta lograr la evaporación del contenido de humedad. Se realiza principalmente en secadores de tipo charola, cuyo recinto forma una columna o un túnel. En el caso de granos se utilizan secadores de lecho fluidizado [48]. Para evaluar los diseños, se puede emplear la simulación la cual mediante modelos se pueden realizar predicciones bajo diferentes condiciones de operación sin necesidad de contar con un dispositivo experimental.

Normalmente la simulación del secado con equipo de tipo túnel se considera cada charola como un volumen de control. Donde se establece el tiempo de residencia de la charola en la cual el producto estará expuesto a las mismas condiciones del aire. Al finalizar este periodo se determina la reducción del contenido de humedad empleando los modelos de cinética de secado, posteriormente, mediante la realización de balances de materia y energía se determina el cambio de temperatura del aire en la salida de cada etapa.

En la práctica dentro de un secador de tipo túnel se hace recorrer un conjunto de charolas en serie, expuestas a un flujo de aire caliente, dentro de un recinto aislado. Conforme el aire se acerca a la última charola de la serie, la humedad relativa del aire de secado aumenta continuamente hasta alcanzar la condición de saturación. Complicando la deshidratación del producto en las etapas posteriores. Debido al incremento del contenido de humedad en equilibrio que puede alcanzar un sólido de acuerdo a sus propiedades de sorción

El incremento de humedad relativa no se considera en el diseño de equipos de secado, lo que podría comprometer el secado del producto en las etapas finales del proceso. En este trabajo se desarrolla un modelo de simulación de la deshidratación por etapas considerando las condiciones de operación de temperatura, velocidad del aire y humedad relativa. Durante un tiempo determinado el producto se expone al aire en manera de capa fina, al finalizar este periodo el contenido de humedad en equilibrio del producto se determina por la isoterma de desorción. En la siguiente etapa las condiciones del aire cambian y por consiguiente la humedad de equilibrio.

3.3.1 Consideraciones para el estudio

En la simulación del secado de hortalizas en un equipo de charolas, ya sea en paralelo o contracorriente, es necesario establecer criterios característicos del equipo, del aire de entrada y del producto. Estos criterios son importantes para determinar las condiciones de operación del proceso y se describen a continuación.

- 1) Criterios del equipo:
 - a) El área de exposición entre el producto y el aire es constante y conocida.
 - b) El equipo está aislado, por lo tanto no existe pérdida de calor por las paredes.
 - c) El aire únicamente circula en una sola dirección.
 - d) Se conocen la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire de entrada.
 - e) La temperatura T_a , humedad relativa HR del aire cambian conforme el aire pasa en cada charola, y se determinan mediante balances de materia y energía.
 - f) El producto que se somete al secado es chile de la especie *Capsicum annum*.
 - g) La cantidad de producto húmedo se conoce m_{sh} y es la constante en todas las charolas.
 - h) Las propiedades físicas del aire son función de la temperatura.

3.3.2 Propiedades físicas del aire y producto

Estableciendo condiciones iniciales del aire es posible determinar propiedades físicas como la densidad y el calor específico del aire, por ejemplo la densidad del aire húmedo la cual depende de la temperatura, como se muestra en la ecuación (44)

$$\rho_a = \frac{353.44}{T_a + 273.15} \quad (44)$$

Conocer la densidad permite determinar el flujo másico del aire al obtener el área de la charola y velocidad del aire. Otra de las propiedades que depende de las condiciones iniciales es el calor específico, se conoce como la cantidad de energía que requiere un kilogramo de cierto material para incrementar su temperatura en un grado centígrado.

Conforme transcurre el secado el calor específico del aire disminuye debido al incremento de masa. Como consecuencia de la transferencia de humedad del sólido al aire, el calor específico se puede determinar a partir de la correlación mostrada en (45).

$$C_{pa} = 0.000000376873 * T_a^2 - 0.0000139008 * T_a + 1.00088 \quad (45)$$

La configuración, diseño y tipo de secado depende del tipo de hortaliza que se somete a deshidratación. Generalmente al iniciar el proceso se conoce la masa húmeda y contenido de humedad del producto, a partir de estas propiedades es posible determinar la masa de agua que es posible retirar del sólido utilizando las ecuaciones (8) y (9). Esta cantidad de agua se reduce debido a las propiedades de sorción conforme transcurre el secado.

3.3.2 Balance de materia

La transferencia de materia es simultánea a la transferencia de calor. La humedad retirada del sólido pasa al aire. A partir de las condiciones establecidas inicialmente para el aire como temperatura, humedad y velocidad, asimismo de conocer el contenido de humedad y la masa del tipo de producto que se somete al secado en cada etapa. Es posible determinar las condiciones de salida una vez que se determine un tiempo de residencia. La condición de salida serán las condiciones de entrada para la próxima etapa, de esta manera se determina la tasa de secado en cada sección del deshidratador.

La masa del sólido húmedo al final de cada etapa se puede expresar como la masa del sólido seco en la entrada más la masa de agua contenida en el sólido menos la masa de agua evaporada como se muestra en la ecuación (46) y se representan en la Figura 16.

$$m_{sh-final} = m_{ss} + m_{acs-inicial} - m_{av} \quad (46)$$

Por otro lado, la masa de aire húmedo se puede determinar de la masa de aire seco más la masa de agua contenida en el aire más la masa de agua evaporada como se muestra en la ecuación (47) y se representan en la Figura 16.

$$m_{ah-salida} = m_{as} + m_{aca-entrada} + m_{av} \quad (47)$$

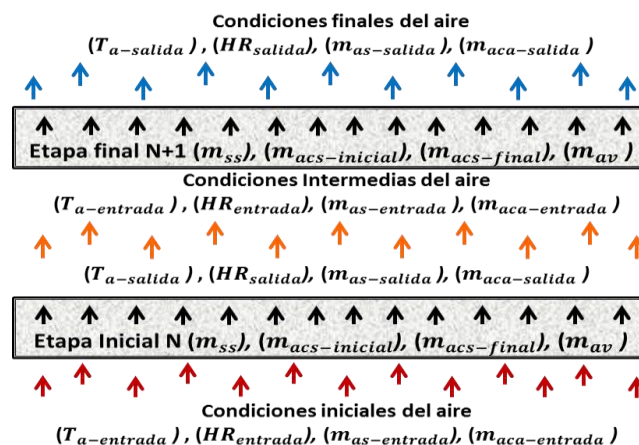


Figura 16.-Esquema del secado en paralelo

La determinación de la cantidad de agua que se evapora en cada etapa, se logra a partir de conocer la cinética de secado representada en la ecuación, (43) la cual depende del contenido de humedad de equilibrio descrita en la ecuación (42). Por lo que el contenido de humedad se puede expresar mediante la ecuación (48):

$$M_n = (MR(M_0 - M_e)) + M_e \quad (48)$$

A partir del contenido de humedad inicial y final en cada etapa, se determina la cantidad de agua evaporada (49):

$$m_{av} = \frac{M_0 - M_n}{100} * m_{ss} \quad (49)$$

Para el caso en el que el aire fluye en dirección opuesta al producto, es decir bajo un arreglo en contracorriente, se tienen condiciones de frontera opuestas. Si se toma como punto de partida la etapa de entrada del producto, no se conoce las condiciones de entrada del aire como se muestra en la Figura 17.

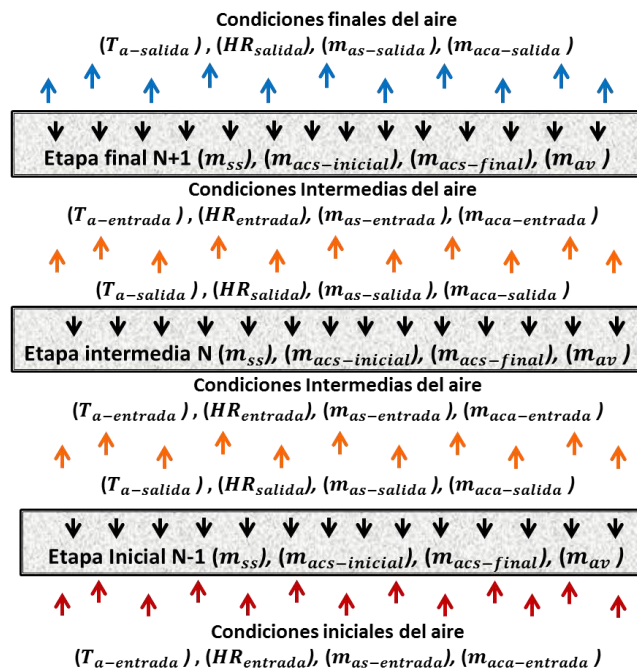


Figura 17. Esquema de secado en contracorriente

Para realizar la evaluación del deshidratador bajo este escenario es necesario suponer la condición de entrada en cada etapa y realizar los balances de materia y energía de manera similar al caso con flujo en paralelo. Al llegar a la última etapa, se compara el valor de salida con la condición que se conoce. De no ser igual se vuelve a iniciar el cálculo asumiendo un nuevo valor en las etapas. El proceso iterativo se lleva a cabo mediante el método de Newton-Raphson. En este trabajo se utiliza la variable del contenido de humedad en cada etapa como la variable que se supone para iteración.

3.3.3 Balance de energía

El secado es un proceso que requiere de energía calorífica para ser realizado. El calor de secado consumido en cada etapa \dot{Q}_e es el calor suministrado por el aire caliente \dot{Q}_a . Además de elevar la temperatura del sólido húmedo se debe proporcionar una cantidad de energía para evaporar el agua. Por lo tanto el calor suministrado por el aire en cada etapa, es igual al calor latente y calor sensible, como se expresa en la ecuación (50), si se considera un proceso adiabático (no existen pérdidas de calor en las paredes del secador).

$$\dot{Q}_a = \dot{Q}_l + \dot{Q}_s \quad (50)$$

El calor latente \dot{Q}_l es la energía necesaria para evaporar 1 kg de la sustancia y se puede calcular como producto de multiplicar la entalpia de vaporización del agua h_{fg} , por el flujo másico de agua evaporada \dot{m}_{av} como se expresa en (51)

$$\dot{Q}_l = \dot{m}_{av} * h_{fg} \quad (51)$$

El calor sensible es la energía requerida para incrementar la temperatura del sólido húmedo se determina como el producto, del calor específico, flujo másico de agua evaporada y el incremento de temperatura como se muestra en la ecuación (52)

$$\dot{Q}_s = C p_p \dot{m}_{sh} \Delta T_p \quad (52)$$

Sustituyendo la expresión (50) por las ecuaciones (51) y (52), se encuentra el calor transferido en cada etapa cuyo balance de energía se expresa en (53):

$$(Cp_a \dot{m}_{ah} \Delta T_a) = (\dot{m}_{vap} * h_{fg}) + (Cp_p \dot{m}_{sh} \Delta T_p) \quad (53)$$

3.3.4 Determinación del cambio de temperatura y humedad relativa

Cuando finaliza el secado en cada etapa ocurre un cambio en la temperatura y humedad relativa. Determinar su valor es necesario puesto que serán las nuevas condiciones de entrada de la siguiente etapa. La disminución de la temperatura e incremento de humedad se definen utilizando los balances de energía y materia anteriormente especificados. El cambio de temperatura se despeja de la ecuación (53). La temperatura de salida del aire se conoce considerando que en el transcurso del secado se logra un equilibrio térmico entre el producto y el aire, la temperatura final del aire y el producto se consideran iguales. La temperatura del aire de salida en cada etapa se obtiene mediante (54):

$$T_{a-salida} = T_{a-entrada} - \Delta T \quad (54)$$

La humedad relativa de salida en cada etapa, se determina a partir de la temperatura siguiendo los siguientes pasos:

- 1) La presión saturación, utilizando correlación expresada en (1).
- 2) Encontrar la masa de agua contenida en el aire mediante la ecuación (55):

$$m_{aca-salida} = m_{aca-entrada} + m_{av} \quad (55)$$

- 3) El valor de humedad absoluta del aire al pasar por cada etapa será encontrado con la ecuación (3).
- 4) A continuación se determina la presión de vapor del aire mediante (56)

$$P_v = \frac{760 * HA}{0.62 \left(1 + \frac{HA}{0.62} \right)} \quad (56)$$

- 5) Con los valores de P_{vs} y P_v se determina la humedad relativa con la ecuación

3.4 Implementación de códigos de simulación

Para facilitar los cálculos del modelo de secado en paralelo y en contraflujo, se implementan códigos desarrollados en Microsoft Visual Basic para Aplicaciones 7.1. Los códigos leen las condiciones de entrada del aire y del producto. En cada etapa evalúan la transferencia de masa y calor. Posteriormente determinan los cambios en la temperatura y la humedad relativa en el aire asimismo el contenido de humedad del producto y peso hasta que finaliza el secado. Este proceso se hace repetitivo según el número de etapas del secador para lo cual se utiliza un ciclo de programación. A continuación se presenta los algoritmos de programación de cada código.

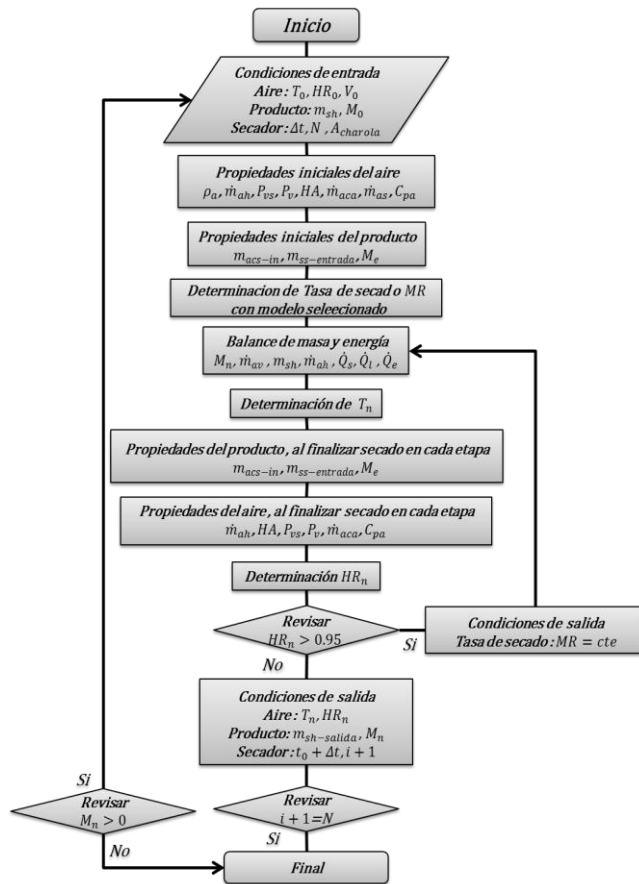


Figura 18 Algoritmo de programación de secado en Paralelo

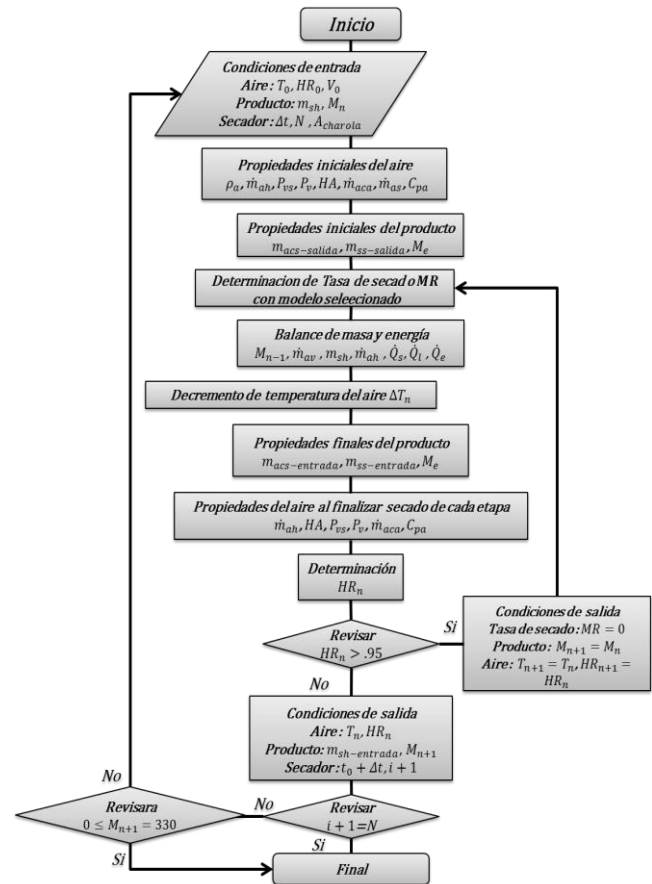


Figura 19 Algoritmo de programación de secado en contraflujo

La diferencia de la programación entre el arreglo paralelo y en contraflujo es que el segundo. Al finalizar el número de etapas correspondientes al secador se evalúa el contenido de humedad en la etapa uno. Si este valor es diferente se al valor real, comienza a iterar nuevamente el programa hasta llegar con el valor correcto, para lograr una mayor convergencia se propone un error porcentual.

3.5 Análisis de sensibilidad

El riesgo asociado con la variabilidad de un parámetro determinado es dependiente del efecto que éste tiene en el criterio de interés. Con la finalidad de identificar la importancia que tienen las variables temperatura, velocidad de aire,

humedad relativa y tiempo de residencia, se comparan los resultados de secado dentro de un intervalo permisible para cada variable. Es de gran importancia reconocer las variables cuya variación provocan un mayor efecto para la condición de salida. De esta manera se presta mayor atención a las variables de más trascendencia. Como punto de comparación, se busca lograr un contenido de humedad en el sólido al término del proceso. También se observa el consumo de energía cuando cambian cada una de las variables observadas

Capítulo 4. Resultados

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta los resultados que se obtienen en el análisis de cada una de las secciones hasta la evaluación del secado. Se utiliza como caso de estudio la hortaliza chile del tipo *Capsicum annuum* que es producido en grandes extensiones en México. En la primera parte se realiza un análisis de los modelos disponibles en la literatura de isothermas de sorción y cinética de secado. Más adelante, se analizan los casos de secado con arreglo entre el flujo del producto y aire en contracorriente y en paralelo. Posteriormente se analizan condiciones de operación como la temperatura, humedad relativa del aire y velocidad, finalmente el tiempo de residencia del producto. Se realiza un comentario final relativo a la sensibilidad de las variables antes mencionadas en el proceso de deshidratación.

4.2 Selección de los modelos de desorción

Con la finalidad de determinar los modelos de sorción y tasa de secado más adecuados para su aplicación en deshidratación de chile, se toman los modelos más utilizados en la literatura abierta y se utilizan los criterios de regresión no lineal utilizando el coeficiente de determinación R^2 y el de raíz del error cuadrático medio $RMSE$ como parámetros de comparación.

Tomando como referencia los datos experimentales reportados en [20] para chile de la especie *Capsicum annuum*. Los modelos de sorción reportados en la Tabla 1, de los cuales se dieron detalles en el capítulo 2. Fueron ajustados y comparados determinando las 3 o 4 constantes de cada modelo, se utilizaron los valores de R^2 y $RMSE$ como indicadores de ajuste. La regresión se hace ajustando las variables de humedad relativa y temperatura de manera simultánea.

El valor de R^2 corresponde a la relación que existe entre los valores calculados a partir de un modelo matemático y los valores experimentales, mientras que $RMSE$ indica la desviación a partir de la diferencia entre el valor experimental y el valor calculado.

La Tabla 3 muestra los resultados de las constantes e , f , g y h para ajustar cada modelo a los datos de Chile y la desviación de R^2 y $RMSE$ para un rango de temperatura del aire entre 20 y 65°C y un rango de humedad relativa de 11 a 97%.

Tabla 3.- Constantes para ajustes para modelos de desorción de Chile, coeficientes de determinación R^2 y $RMSE$.

Modelo	e	f	g	h	R^2	$RMSE$
<i>Kaleemullah</i>	0.958627	1.654015	0.001817	1.095654	1	1.582E-08
<i>Henderson</i>	0.301862	-271.3544	1.604792	-	0.9736328	0.0056754
<i>Chung Pfof</i>	85.41795	9.324988	-284.3161	-	0.9612847	0.0068771
<i>Halsey</i>	<i>10.89591</i>	<i>0.0526113</i>	<i>2.902259</i>	-	<i>0.9580566</i>	<i>0.007158</i>
<i>Oswin</i>	1215.451	-16.99193	2.50711	-	0.93207491	0.0141504

Como es de esperar, los resultados muestran que el modelo de Kaleemullah replica los resultados y la proporción de variación es menor debido a que cuenta con una constante más que los otros modelos.

Aunque los modelos de Henderson, Halsey y Oswin han sido anteriormente aplicados para isotermas en hortalizas, en este caso muestran una desviación importante con los datos experimentales. A continuación se comparan gráficamente las isotermas de desorción con los diferentes modelos para una temperatura de 20 °C mostradas la Figura 20

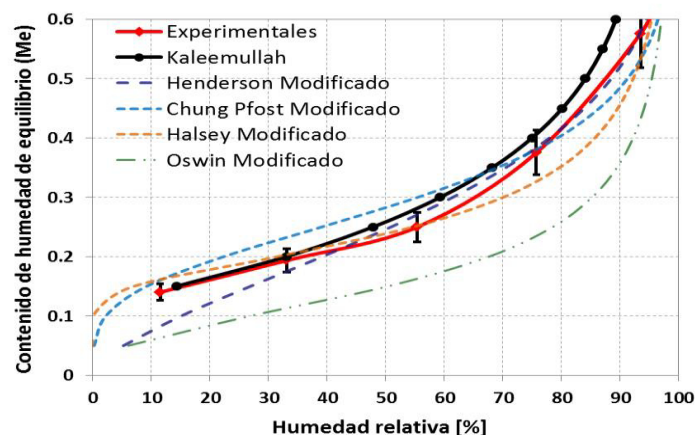


Figura 20.- Isotermas de equilibrio para chile a 20°C.

Las isotermas obtenidas a partir de los modelos ajustados se aproximan a una función exponencial. Donde se observa un crecimiento del contenido de humedad importante cuando el valor de la humedad relativa es mayor al 80%. También se observa que a mayor temperatura el crecimiento exponencial es más pronunciado. Aunque el modelo de Kaleemullah resultó con un ajuste bastante bueno, se observa que a una temperatura de 20°C se tiene un error que está dentro un rango menor al 10% para humedades relativas por debajo del 75%. Asimismo se grafican las isotermas de los modelos para un temperatura de 60°C en la Figura 21

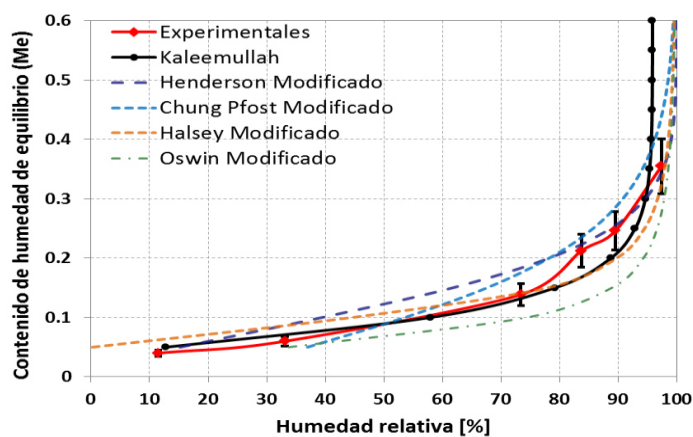


Figura 21.- Isotermas de equilibrio para el chile a 60°C.

Para el caso de 65°C el error del 10% se conserva hasta una humedad relativa del 80%. En el resto de los modelos se puede observar un buen ajuste para un rango específico de humedad relativa y temperatura. Por ejemplo, el modelo de Halsey muestra una buena predicción a 65°C, mientras que el modelo de Henderson para una temperatura de 20°C y humedad relativa mayor de 30%. El análisis de validación estadística posiciona al modelo de Kaleemullah como el más adecuado para que mediante una regresión, se determinen las constantes que permitan la predicción de la isoterma de desorción en un rango de humedad relativa a una condición de temperatura establecida. Para el caso de Chile de la especie *Capsicum annum* se obtuvieron valores de $R^2=1$ y una $RMSE=1.582E-08$, en un rango de temperatura de 20°C a 65 °C y humedad relativa de 11% hasta 95.5%. Seguido del modelo de Henderson modificado que obtuvo valores de R^2 y $RMSE$ de 0.9736328 y de 0.0056754 respectivamente.

4.3 Selección de los modelos de cinética de secado de Chile

Como se presentó anteriormente de los seis modelos más utilizados en la literatura abierta para predecir el secado de hortalizas (Tabla 2). Los más empleados para predecir el secado de Chile, son los modelos de Page y Kaleemullah. La precisión entre ambos modelos es demasiado similar a diferentes temperaturas como se observa en la Figura 22.

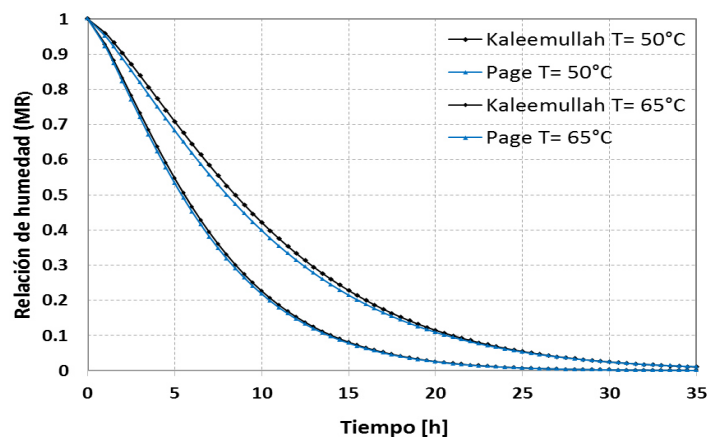


Figura 22.- Relación de humedad vs tiempo de secado [2].

Regularmente estos modelos se han aplicado a escala laboratorio y bajo una condición en capa fina, se identificó en la literatura, la aplicación del modelo de Kaleemullah para una misma variedad de chile bajo condiciones de capa fina [49] y para un deshidratador de tipo rotatorio [34]. Utilizando las constantes propuestas en cada estudio, se puede observar que la tasa de secado bajo una temperatura del aire de 65°C se modifica de manera importante como se observa en la Figura 23. Donde el tiempo necesario para alcanzar una relación de humedad de 0.02, corresponde a un contenido de humedad de un 10% bs aumenta de 12 a 25 horas.

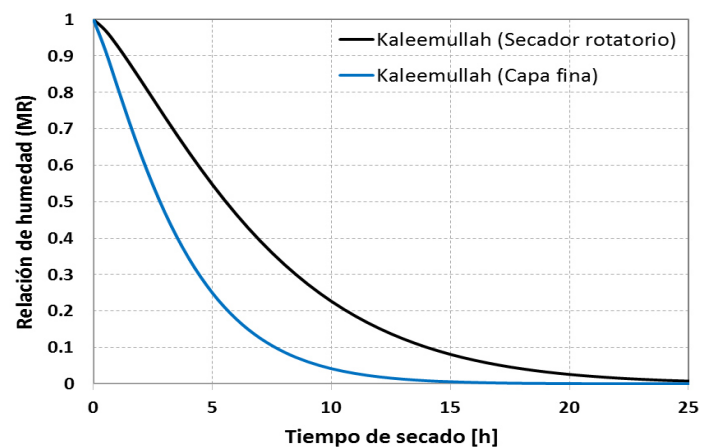


Figura 23.- Comparación del modelo de Kaleemullah bajo condiciones de secado en capa fina y en un secador rotatorio.

Los resultados que se observan en el secador rotatorio, muestran la importancia que tiene la interacción del aire con las partículas de producto durante el proceso. Dada esta observación y su posible aproximación a un proceso de secado, donde existe la interacción entre aire y partículas, se ha decidido utilizar este modelo para futuras predicciones. Para observar lo robusto del modelo de Kaleemullah, se ha utilizado para predecir la tasa de secado de otros productos agrícolas como mango y plátano reportados en [30]. Los resultados del ajuste para de R^2 son muy precisos siendo de 0.996 para el mango y de 0.999 en el plátano. Mientras los resultados $RMSE$ de 0.0025343 y 0.0016108 respectivamente. Las constantes para cada producto para temperatura de 60°C se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Constantes obtenidas para el modelo de Kaleemullah para predecir el secado de mango y plátano con sus respectivos valores de R^2 y RMSE.

Modelo Kaleemullah	Temperatura °C	a	b	c	d	R^2	RMSE
Mango	60	0.0010021	0.0441122	-0.0035886	1.21654	0.996	0.0025343
Plátano	60	0.0015789	0.0352799	0.0043806	0.7067475	0.999	0.0016108

De manera gráfica en la Figura 24, se comparan los valores experimentales con los resultados de la predicción de la cinética de secado utilizando el modelo de Kaleemullah para plátano y mango a 60°C.

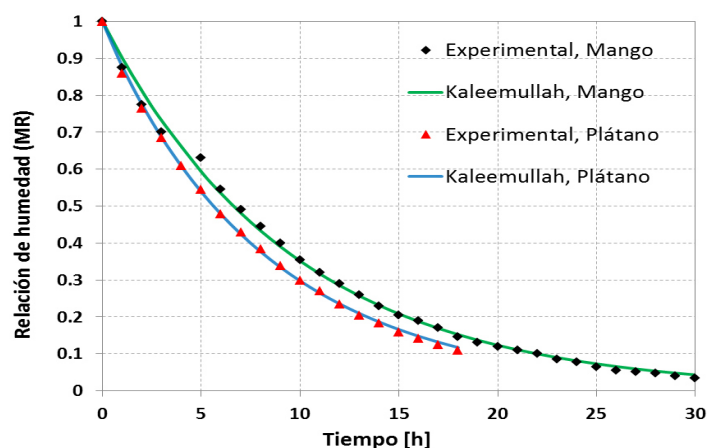


Figura 24.- Comparación de curvas de tasas de secado experimentales y predichas a 60 °C.

Para el mango la predicción del secado es ligeramente diferente en las primeras 6 horas pero conforme el tiempo transcurre, las curvas de secado del modelo y experimental se igualan. En el plátano los datos obtenidos del modelo son idénticos a las experimentales. Por lo tanto el modelo de Kaleemullah es suficientemente robusto para determinar la tasa de secado de hortalizas y otros productos agrícolas.

4.4 Efecto de la temperatura en el secado

Regularmente en la industria el secado se realiza considerando la temperatura inicial del aire y se evalúa con la diferencia de pesos del producto de entrada con el de salida. Aunque el aire caliente reduce su temperatura y aumenta su humedad relativa a medida que atraviesa el sólido húmedo, estos cambios se llegan a considerar en muy pocas ocasiones. En otros casos suele involucrarse un modelo de tasa de secado el cual no considera los cambios de temperatura en el proceso.

La humedad relativa tiene una influencia menor en la cinética de secado y es por lo general despreciada en la operación. Por esta razón, la mayoría de los estudios de secado reportados en la literatura presentan curvas de operación a temperatura constante. En la Figura 25, se muestran tres curvas bajo diferentes temperaturas de 40, 50 y 60°C. El secado asume que el sólido húmedo se encuentra bajo el flujo de aire a la misma velocidad, temperatura y humedad relativa durante todo el proceso. Las curvas fueron derivadas para chile jalapeño del género *capsicum annuum* que cuyo contenido de humedad inicial es de 330% bs. El proceso termina cuando el producto alcanza un contenido de humedad de 10.5% bs, cuyo valor es adecuado para la preservar esta hortaliza.

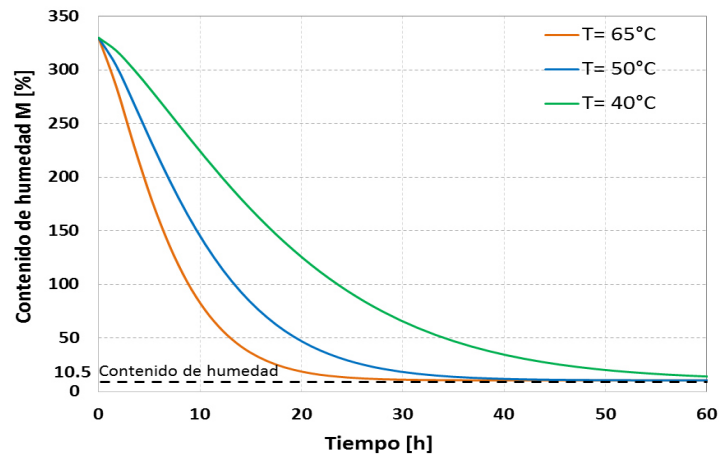


Figura 25.- Curvas típicas de operación de secadores por convección bajo distintas temperaturas de aire.

Se aprecia que el tiempo para alcanzar el contenido de humedad deseado, varía de manera importante con la temperatura del aire. Para una condición de 65°C el tiempo de secado es cercano a 27 horas, este se incrementa a 37 horas cuando la temperatura del aire se reduce a 50°C y toma más de 60 h cuando la temperatura es de 40°C .

4.5 Efecto de la humedad relativa en el secado

En el caso anterior solo se ha considerado la temperatura dentro de un secador de tipo túnel. Pero debido a las propiedades de sorción, el contenido de humedad que puede alcanzar un producto se ve afectado por la saturación del aire. A medida que la humedad relativa del aire se incrementa, disminuye su capacidad para deshidratar el producto. Una vez que el aire alcanza el punto de saturación, es decir una humedad relativa del 100%, el proceso se interrumpe. En la Figura 26 se muestra el efecto en el contenido de humedad del producto bajo una humedad relativa del aire de 40 y 95% en dos esquemas de temperatura. Esta simulación asume que el producto está expuesto a la misma condición del aire durante todo el proceso.

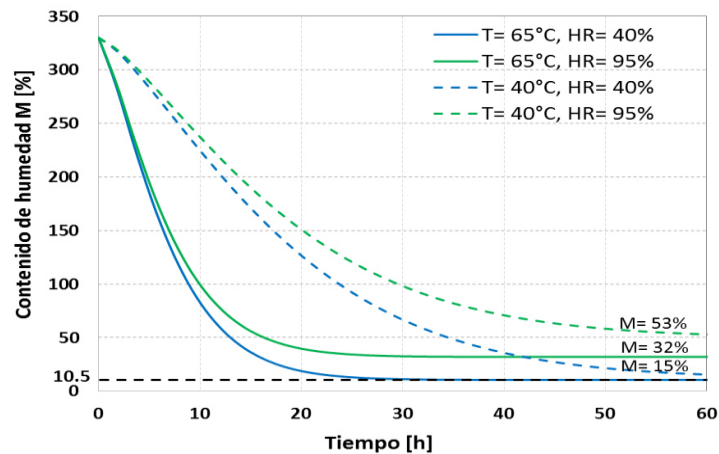


Figura 26.- Curvas de operación incluyendo la humedad relativa constante como parámetro en el proceso.

Cuando el aire entra a 65°C, se observa una asíntota que alcanza un contenido de humedad de 10.5 y otra con valor de 32% para una humedad relativa del aire de 40 y 95% respectivamente. Es claro que el aire húmedo aun utilizando una temperatura alta, no es capaz de lograr los contenidos de humedad requeridos.

Para el caso en que la temperatura es de 40°C, los tiempos para lograr un comportamiento asintótico superan las 60 h. Se alcanza un contenido de humedad de 15% y 53% para una humedad relativa de 40 y 95% respectivamente. Aunque su importancia es menor que el efecto de la temperatura este análisis demuestra que la humedad relativa del aire es un factor importante para alcanzar un contenido de humedad en el producto.

4.6 Curva de operación de un secador

En un secador de tipo túnel, el producto húmedo entra en contacto con el aire bajo ciertas condiciones, las cuales cambian conforme el aire atraviesa cada etapa del equipo, su temperatura disminuye y la humedad relativa incrementa.

En este trabajo se plantea dividir el secador en secciones o etapas en las cuales el aire y el producto cambian sus condiciones según el tiempo que permanezcan en ella. Una simulación de este tipo permite conocer las condiciones intermedias en el proceso, además de predecir el tiempo en el que se logra un contenido de humedad final.

La curva de operación del secado por etapas para el chile jalapeño con 330% bs en un deshidratador de túnel con 30 charolas de 1m^2 cada una con 10 kg de chile, se muestra en Figura 27. Se consideran 30 etapas, con una velocidad de aire de 0.15 m/s con dirección en paralelo con el producto y un tiempo de residencia del producto en cada etapa de 1.75 h. La condición de velocidad es de las menores reportadas en la literatura.

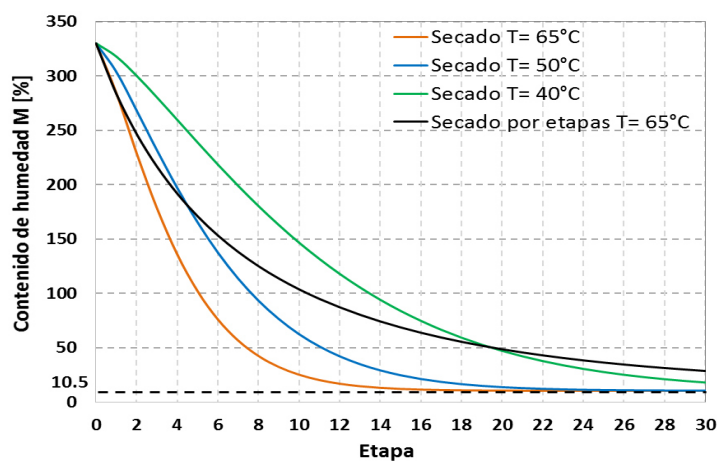


Figura 27.- Curva de operación de un secador por etapas, evaluando únicamente la temperatura.

Para un secado por etapas la curva de operación cruza en diferentes secciones del deshidratador las curvas de una deshidratación bajo una temperatura constante. Se observa que en la etapa 5, la curva del secado por etapas cruza la isoterma de 50°C y en etapa 20 la curva de secado bajo temperatura constante de 40°C. Una vez concluidas las 30 etapas, el contenido de humedad que se alcanza en el producto es de 48% bs, valor superior al requerido para preservar el producto. Con este análisis se demuestra la gran importancia que tiene el considerar los cambios que experimenta el aire y el producto durante el proceso de secado.

4.7 Configuración de un secador

En un secador de tipo túnel, se tiene la posibilidad de suministrar el aire por el mismo lado por donde se alimenta el producto dando una configuración en paralelo o por el lado opuesto teniendo una configuración en contracorriente. En el arreglo en paralelo la reducción de humedad es mayor en las etapas iniciales debido a que se tiene un mayor gradiente de concentración de humedad. Al finalizar el proceso, la deshidratación se dificulta por que disminuye el gradiente de concentración.

En el arreglo en contraflujo, el aire con mayor temperatura y menor humedad relativa se pone primeramente en contacto con el producto de menor contenido de humedad, favoreciendo el secado en las últimas etapas del secador.

Si se toma como caso de estudio el mismo secador que el caso anterior con la misma cantidad de producto de aire son 65°C, 50% de humedad relativa, velocidad de 0.20 m/s y el tiempo de residencia por etapa de 1.75 horas. Considerando la disminución de temperatura y aumento de humedad relativa. Se obtienen los perfiles de reducción de contenido de humedad para el arreglo en paralelo y en contraflujo. La importancia del tipo de arreglo del secado, se observa en los perfiles de reducción de humedad en la Figura 28.

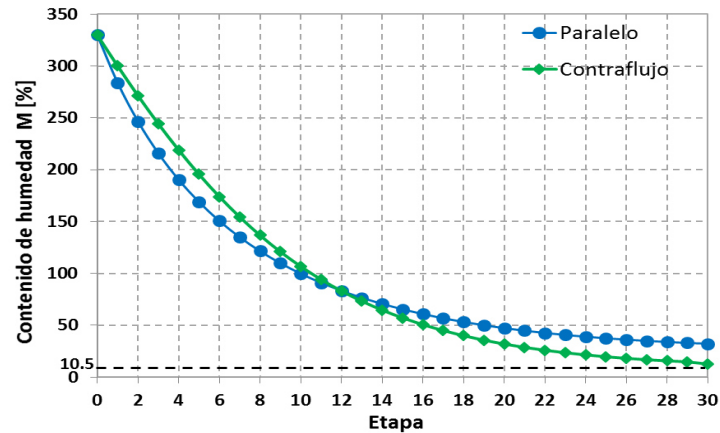


Figura 28.- Contenido de humedad para las configuraciones en paralelo y en contracorriente.

Durante las primeras 12 etapas, el contenido de humedad para un arreglo en paralelo es menor que en el arreglo en contracorriente. A partir de esta etapa las curvas se cruzan resultando que, el arreglo con flujo en contracorriente logre menor contenido de humedad. Para el arreglo en paralelo, el contenido de humedad que alcanza después de 30 etapas es de 31.2% mientras que en el arreglo en contracorriente es de 12.5%. Los perfiles de humedad relativa y el contenido de humedad para un proceso con arreglo en paralelo se aprecian en la Figura 29.

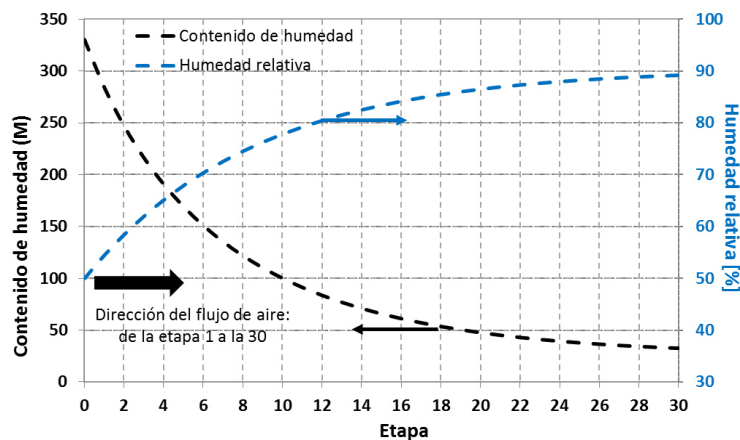


Figura 29.-Perfil de contenido de humedad y saturación del aire para un arreglo en paralelo.

Durante el secado con arreglo en paralelo, la humedad relativa se incrementa desde 50% hasta 88%. Conforme transcurre el proceso, disminuyendo el gradiente de concentración en cada etapa. En el secado con arreglo contraflujo el aire de entrada hace contacto inicialmente, con la última etapa por lo que la de humedad relativa tiene un comportamiento inverso al perfil en paralelo, como se muestra en la Figura 30.

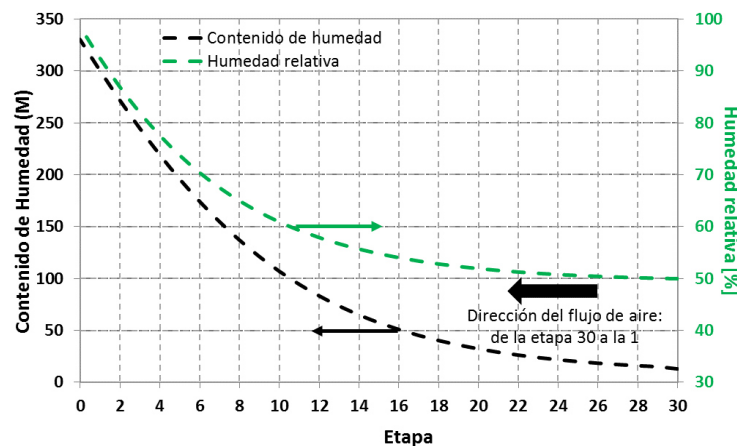


Figura 30.- Perfil de contenido de humedad y saturación del aire para un arreglo en contraflujo.

Evidentemente el aumento en la humedad relativa del aire es mayor en un arreglo en contraflujo en comparación con el paralelo, el cual incrementa desde 50% hasta 88%. Debido a que en un arreglo en contraflujo las etapas han estado en contacto con aire, por lo que el producto tiene una mayor presión de vapor que el aire de entrada. Favoreciendo el transporte de humedad al aire a medida que el aire atraviesa cada etapa.

El tipo de arreglo en un secador de tipo túnel también favorece la reducción de temperatura del aire, a medida que la humedad relativa aumenta. En la Figura 31 y Figura 32 se muestran los perfiles de temperatura y humedad relativa en un proceso con arreglo en paralelo y en contraflujo respectivamente.

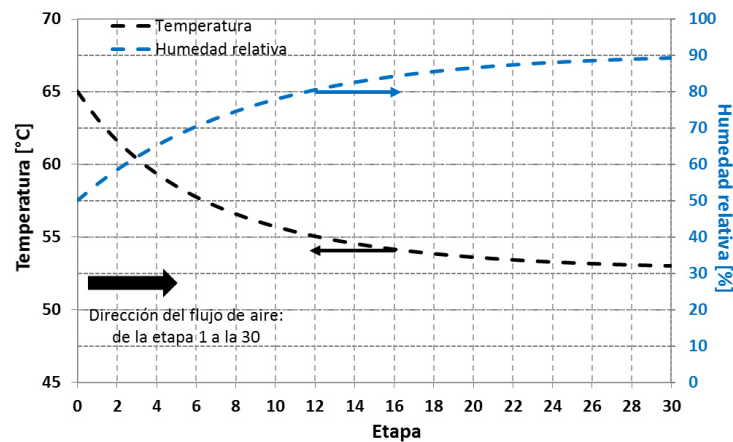


Figura 31.- Perfil de temperatura y humedad relativa del aire para un arreglo paralelo.

En el caso de un arreglo con flujo en paralelo, la temperatura disminuye hasta 53°C y la humedad relativa aumenta al 88%. Para el arreglo en contraflujo la temperatura del aire alcanza los 51°C y la humedad relativa se incrementa a 98%. La mínima diferencia de temperatura de 2°C entre los arreglos indica que el uso de la energía es más favorable en el arreglo en contracorriente. Este beneficio es más importante a medida que la velocidad del aire se incrementa.

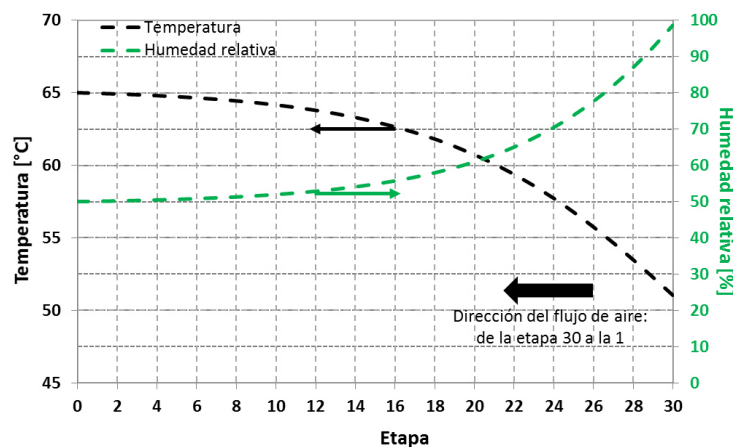


Figura 32.- Perfil de temperatura y humedad relativa del aire para un arreglo en contraflujo.

4.8 Análisis de temperatura en el secado por etapas

En esta sección se analiza el efecto de la temperatura del aire que entra a un secador tipo charolas para lograr un contenido de humedad deseado. Usando como caso de estudio las mismas condiciones de humedad relativa, velocidad y tiempo de residencia. Variando y analizando diferentes temperaturas del aire a la entrada a 65°C, 55°C y a 45°C para un secador con arreglo en paralelo y contraflujo. La Figura 33 muestra los perfiles de reducción de humedad para arreglo en paralelo y contraflujo de cada condición de temperatura.

Bajo una misma temperatura de entrada del aire, se puede observar un punto de intersección entre los arreglos en contracorriente y flujo en paralelo. A una menor temperatura, el punto de intersección ocurre en una etapa más avanzada. La separación entre las curvas también es mayor entre menor sea la temperatura del aire. En un secador con arreglo en paralelo si el aire entra a 45°C el contenido de humedad alcanzado en la etapa 30 es de 121%, para un arreglo en contraflujo es de 100%. Si la temperatura aumenta a 55°C el contenido de humedad se reduce hasta 57% y 32.1% en paralelo y contraflujo respectivamente.

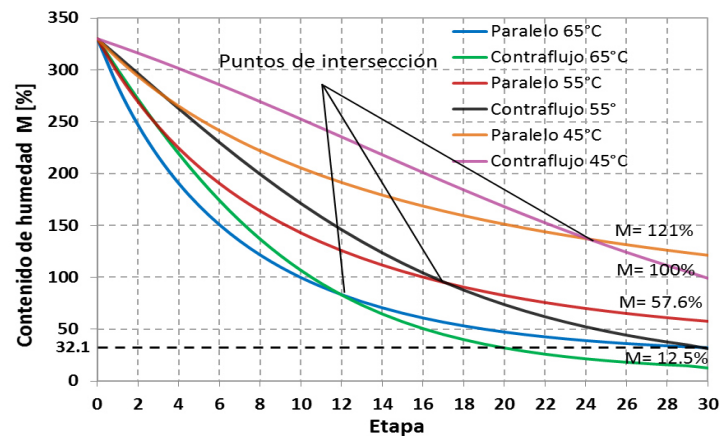


Figura 33.- Efecto de la temperatura para secado en paralelo y en contracorriente.

Finalmente, si el aire entra a 65°C, se alcanza un contenido de humedad de 32.1% con un arreglo en paralelo y 12.5% en contraflujo. Es importante observar que se puede lograr un contenido de humedad de 32.1% con un arreglo en contraflujo con temperatura del aire a 55°C o con un arreglo en paralelo con temperatura del aire de 65°C. El uso de uno u otro esquema, podría tener implicaciones en el consumo de energía importantes, ya que gran parte de la energía utilizada en el secado se debe al calentamiento del aire en la entrada.

4.9 Análisis de humedad relativa en el secado por etapas

A medida que el aire atraviesa cada etapa del deshidratador, su humedad relativa incrementa gradualmente reduciendo su potencial para secar. Si se mantiene una baja humedad relativa en el aire, es posible alcanzar un contenido de humedad determinado en un menor número de etapas o tiempo de residencia. Debido a que el aire utilizado para el secado se toma del ambiente la humedad relativa cambia según la estación del año. En este estudio se analiza el secado utilizando una humedad relativa inicial de 30%, 45%, 55% y 60%. También asume que la condiciones de temperatura y velocidad del aire de entrada son de 65°C y 0.20 m/s respectivamente y que el tiempo de residencia es de 1.75 horas por etapa. La curva de operación del deshidratador con arreglo en paralelo se muestra en la Figura 34.

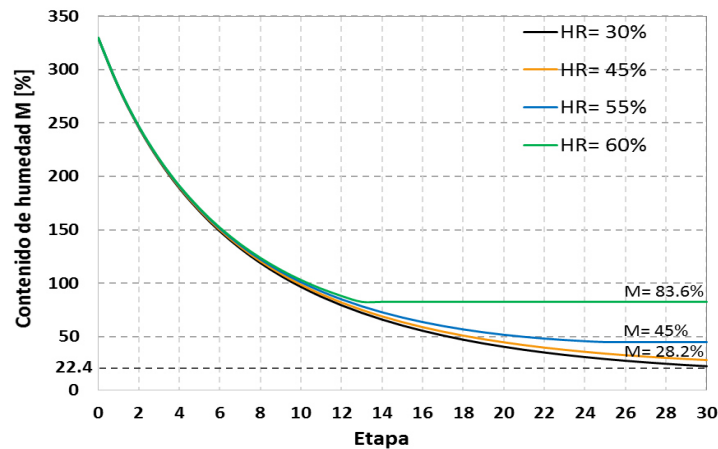


Figura 34.- Curvas de reducción de humedad con arreglo en paralelo a diferente humedad relativa.

Si la humedad relativa inicial del aire es de 30% el producto alcanza un contenido de humedad de 22.4% al cabo de 30 etapas. Si se utiliza aire cuya condición de HR es de 45% se alcanza un contenido de humedad de 28.2%. Cuando la humedad del aire se eleva a 55% la remoción de humedad es menor y se obtiene un contenido de humedad de 45%.

Se puede observar que hacia el final de esta curva se tiene una línea horizontal a partir de la etapa 25. Esto se debe a que en este punto el aire se satura y no tiene posibilidad de seguir reduciendo el contenido de humedad del producto. Este fenómeno es más evidente para una humedad relativa del 65% en donde el aire se satura en la etapa 13 y el contenido de humedad que se alcanza es del 83.6%. También se observa que mientras el aire no llegue a su punto de saturación la diferencia entre las curvas de operación, no muestran un cambio significativo.

Para un proceso de secado con las mismas condiciones pero en arreglo contraflujo los perfiles de la reducción del contenido de humedad se muestran en la Figura 35. En este arreglo el contenido de humedad alcanzado en las últimas etapas cuando el aire tiene la humedad relativa de 30% y 45% es el mismo. Sin embargo cuando el aire entra con una humedad relativa del 55% no ocurre deshidratación del producto en la primera etapa.

Ya que el aire ha pasado por las etapas subsecuentes y al cruzarse con la etapa uno, está completamente saturado. Para el caso con una humedad relativa inicial de 60%, en las primeras 16 etapas el producto no muestra una deshidratación, debido a que el aire se encuentra saturado. El contenido de humedad al final es alto desaprovechándose una parte importante del proceso de secado. Nuevamente el contenido de humedad alcanzado en la última etapa, es menor para el arreglo en contracorriente que para el arreglo en paralelo en todas las distintas condiciones de humedad en el aire.

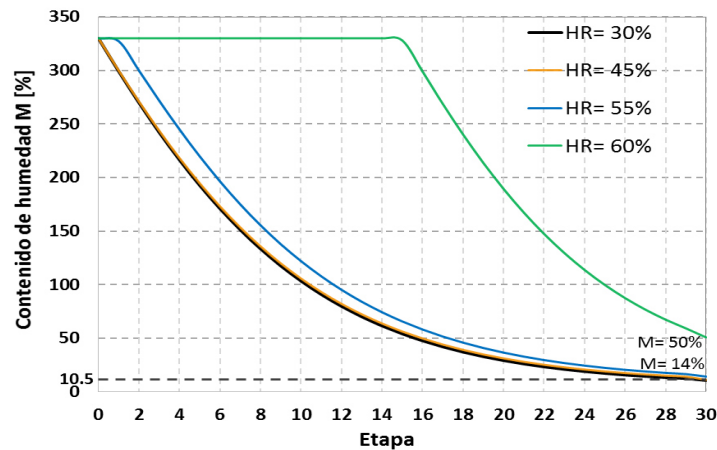


Figura 35.- Curvas de reducción de humedad con arreglo en contraflujo a diferente humedad relativa.

4.10 Análisis de la velocidad en el secado por etapas

La velocidad del aire es de gran importancia en la operación de un deshidratador tiene implicaciones en el consumo de energía. Si bien una mayor cantidad de aire favorece una mayor tasa de secado, por otro lado incrementa el costo de operación. Este análisis toma velocidades del aire de entrada de 0.20 m/s, 0.30 m/s, 0.50 m/s y de 1.5 m/s, con temperatura de 65°C, humedad relativa de 55% y tiempo de residencia 1.75 h por etapa. En la Figura 36 se presentan las curvas de operación para un secador con arreglo en paralelo.

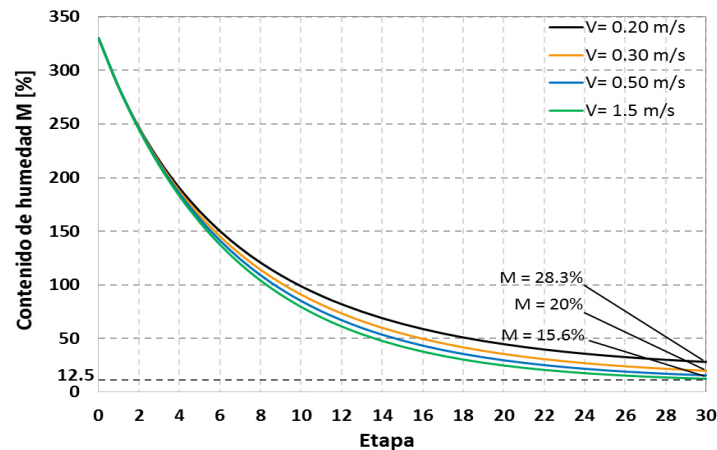


Figura 36.- Efecto de velocidad en el contenido de humedad durante el secado con en paralelo.

Se observa que existe una mejoría en la remoción de humedad al aumentar la velocidad del aire desde 0.20 m/s a 0.30 m/s, el contenido de humedad logrado en la última etapa disminuye de 28.3% hasta 20%. Esta mejoría se reduce al incrementar la velocidad de 0.30 m/s a 0.50 m/s donde el contenido de humedad hasta alcanzar un contenido de humedad de 15.6 reduciendo solo un 4.4%. Si la velocidad del aire se incrementa hasta 1.5 m/s el contenido de humedad se reduce a 12.5%, disminuyendo la capacidad del aire para remover la humedad. Para este estudio con arreglo en contraflujo este efecto también se aprecia en la Figura 37.

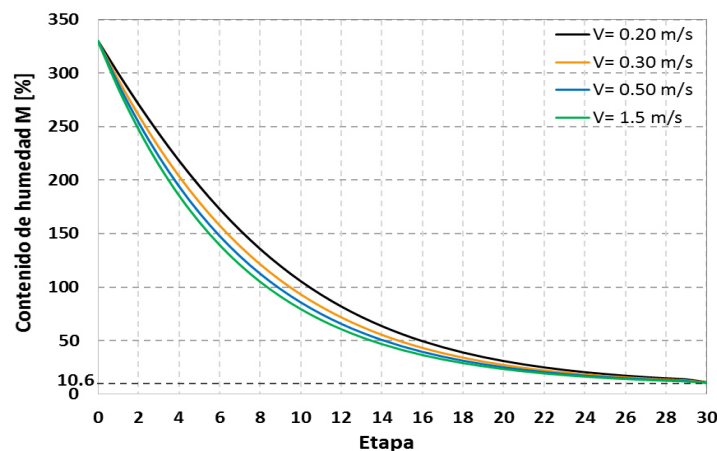


Figura 37.- Efecto de la velocidad en el contenido de humedad durante el secado en contraflujo.

Se observa en las curvas de operación que al incrementar la velocidad del aire de entrada el beneficio de la reducción del contenido humedad es menor en comparación que un arreglo en paralelo. Debido a que el contenido de humedad en equilibrio se alcanza en menor tiempo, como consecuencia de la exposición de las etapas intermedias al aire.

Los perfiles de reducción de humedad son obtenidos al ingresar aire con una temperatura de 65°C con humedad relativa de 50% con velocidades de 0.20 m/s, 0.30 m/s, 0.50 m/s y 1.5 m/s. Cuando la velocidad del aire es 0.20 m/s la reducción de humedad es menor hasta la etapa 24. Si el aire se incrementa a 0.30 m/s la reducción de humedad aumenta, pero a partir de la etapa 24 el perfil del contenido de humedad se iguala con el perfil de la condición anterior de 0.20 m/s. A una velocidad de 0.50 m/s es mayor la reducción de humedad en comparación con la condición de 0.30 m/s igualándose en la etapa 26. Por último se muestra el perfil de reducción de humedad para una velocidad de 1.5 m/s en donde se observa que hasta la etapa 25 se obtiene un menor contenido de humedad. Sin embargo en las etapas restantes el contenido de humedad es igual al alcanzado con las condiciones anteriores. El consumo energético de un soplador que brinde las condiciones de velocidad adecuadas para alcanzar un contenido de humedad adecuado puede reducirse al cambiar el tipo de arreglo del proceso.

4.10 Análisis de tiempo de residencia

Un mayor tiempo de residencia implica mayor exposición del producto a las mismas condiciones de temperatura, humedad relativa y velocidad. Permitiendo que en cada etapa el producto y el aire se aproximen al equilibrio de sorción. El menor valor de contenido de humedad se alcanzara cuando el producto este en contacto con el aire a la mayor temperatura y menor humedad absoluta posible. Logrando menores tiempos de deshidratación, a esta condición se conoce como secado en capa fina.

Para analizar el comportamiento de las curvas de secado se considera que el aire entra con las condiciones de temperatura de 65°C, humedad relativa de 30% y velocidad de 0.20 m/s. Los tiempos de residencia son de 1.75, 1.5, 1.25 y 1 hora. En la Figura 38 se muestran las curvas de contenido de humedad para un secador con arreglo en paralelo y la Figura 39 para uno con arreglo en contraflujo.

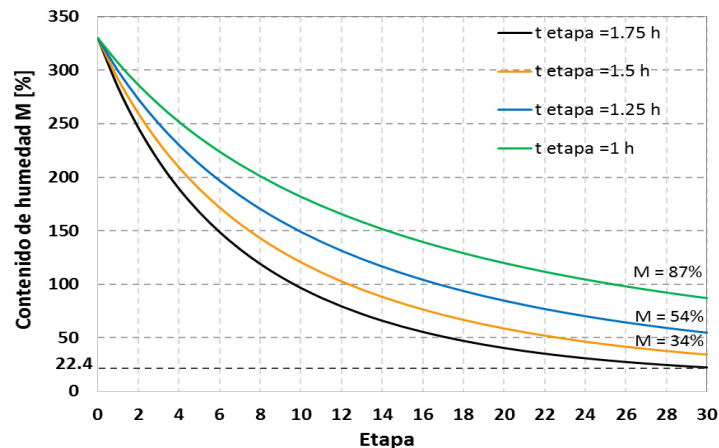


Figura 38.- Curvas del contenido de humedad en secado con arreglo en paralelo variando el tiempo de residencia.

En un proceso con arreglo en paralelo, cuando el tiempo de residencia es de una hora por etapa el contenido de humedad alcanzado en la última etapa es de 87% después de 30 horas de proceso. Si el tiempo de residencia por etapa es de 1.25 h por etapa, después de 37.5 horas se obtiene una reducción de humedad hasta 54%. El aumento en la reducción de humedad es de 33% si el tiempo de secado se incrementa. Sin embargo este beneficio se reduce si el tiempo de residencia por etapa aumenta desmesuradamente. El mismo efecto se observa en este caso, si el tiempo de secado es de 45 horas es decir 1.5 h por etapa. El contenido de humedad alcanzado en la última etapa es de 34%, reduciendo la humedad un 20%. Finalmente cuando el secado dura 52.5 horas en total se alcanza un contenido de humedad 22.4%, la diferencia de reducción de humedad 11.6% siendo menor a medida que el tiempo de secado aumenta. A continuación se muestran los perfiles de contenido de humedad del mismo secador pero con un arreglo en contraflujo.

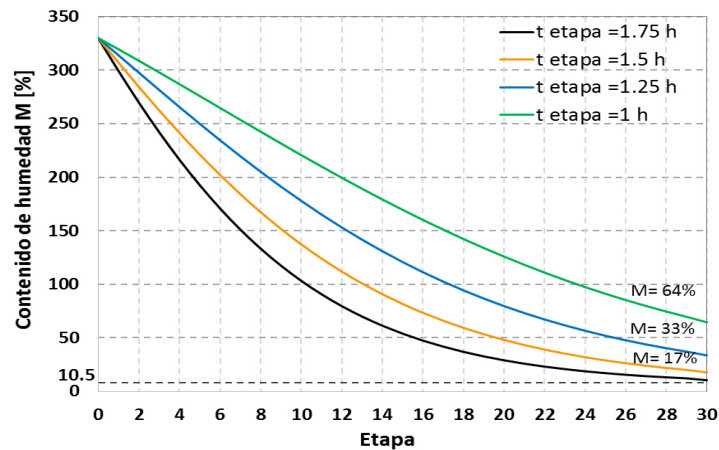


Figura 39.- Curvas del contenido de humedad para secado con arreglo en contraflujo variando tiempo de residencia.

En este caso de estudio pero en un equipo con arreglo en contraflujo, nuevamente se aprecia que la reducción de humedad es mayor en comparación con el arreglo en paralelo. Pero que el beneficio de reducción de humedad al incrementar el tiempo es menor. Como consecuencia de mayor exposición del producto con el aire, permitiendo se alcance el contenido de humedad en equilibrio.

Cuando el tiempo de secado es de 30 horas es decir 1 hora por etapa, el contenido de humedad en la etapa 30 es 64%. Si el tiempo de residencia aumenta a 1.25 horas el contenido de humedad en la última etapa se reduce hasta un 33%. El contenido de humedad alcanzado en el producto sometiendo a 1.5 horas por etapa es de 17%, al transcurrir 45 horas. En el último caso si el proceso de secado es de 52.5 en periodos de 1.75 h por etapa el contenido de humedad final es de 10.5%

Capítulo 5. Conclusiones

El presente trabajo consistió en evaluar el desempeño de un secador de tipo túnel mediante un análisis de sensibilidad variando las condiciones iniciales del aire como temperatura, humedad relativa y velocidad asimismo del tiempo de residencia en cada etapa el secado. En este análisis se considera la disminución de temperatura e incremento de humedad del aire, estos cambios se obtienen de un balance de materia y energía. A partir de conocer las propiedades de desorción y la tasa de secado de chile del genero *Capsicum annuum*, que es una hortaliza de alto consumo, producción y exportación en el país. Además tiene un valor nutricional por su alto contenido de vitamina C y medicinal por el alto contenido de capsaicina que es un antioxidante y analgésico natural.

Para determinar las propiedades de sorción de esta hortaliza se realizó una comparación de los modelos mostrados en la Tabla 1. Estos modelos son los más empleados para predecir isothermas y son recomendados por la “American Society of Agricultural Engineers (ASAE)” [21]. Sin embargo el modelo de Kaleemullah propuesto en [22] tiene un mejor ajuste con los valores experimentales reportados en [20]. Este modelo tiene cuatro constantes lo cual permite un mayor grado de ajuste, los valores de estas constantes se muestran en Tabla 3, junto con los resultados del análisis de R^2 y $RMSE$ 1 y de 1.582E-08 respectivamente. Siendo este modelo el más indicado para predecir las isothermas de sorción de chile en un rango de temperatura de 20 a 65°C y un rango de humedad relativa de 10% a 95%.

La determinación de la tasa de secado es compleja ya que influyen características como: el área de la superficie del sólido, la porosidad, permeabilidad de la cubierta al paso del agua difusión en el interior del sólido y contenido de humedad. Por esta razón se han determinado modelos de cinética de secado. En el presente estudio se emplea el modelo propuesto en [34] por Kaleemullah, cuenta con cuatro constantes lo cual le permite un mayor grado de ajuste en comparación con el resto de los modelos que aparecen en la Tabla 2.

Es adecuado para predecir el secado de varias hortalizas como mango y plátano, como se muestra en la Tabla 4 donde las constantes son adecuadas para una temperatura de 30°C a 65°C. Los análisis de ajuste tienen un resultado del coeficiente de determinación R^2 cercano a 1 y el valor de $RMSE$ cercano a cero. Asimismo este modelo considera que el secado se realiza en equipos comúnmente utilizados en la industria, lo cual hace más real la simulación del secado.

Este documento demuestra que considerar la humedad relativa en el proceso de secado contribuye a la realizar el diseño y operación de una manera más real permitiendo un mejor aprovechamiento de energía. Debido a que normalmente en la industria el secado se realiza considerando la temperatura del aire constante, como se explica en la Figura 25. Sin embargo la humedad es un parámetro que afecta el contenido de humedad que un sólido puede alcanzar, debido a las propiedades de sorción como se observa en Figura 26. Además el aumento de humedad relativa en el aire disminuye la temperatura del aire simultáneamente como se observa en la Figura 27. Para evaluar estos cambios en un secador de tipo túnel se asume cada charola como volumen de control y realizando un balance de masa y energía conforme el aire atraviesa cada etapa.

Por otra parte en un secador de tipo túnel se puede según la dirección del aire o de las charolas, es posible tener un arreglo en paralelo y en contraflujo. En el presente estudio se hace una comparación entre los arreglos llegando concluyendo que en todos los casos de sensibilidad el arreglo en contraflujo tiene mayor reducción de humedad en las últimas etapas.

De acuerdo al análisis de sensibilidad, el parámetro más importante del proceso de deshidratación es la temperatura, ya que a mayor temperatura, la humedad del aire disminuye permitiendo un mayor gradiente de concentración entre el aire y el sólido. Contribuyendo a que sea menor el contenido de humedad alcanzado al finalizar el secado, aunque el tipo de arreglo influye en la temperatura requerida para alcanzar un contenido de humedad como se observa en la Figura 33. Donde el contenido de humedad alcanzado en la última etapa es el mismo cuando la

temperatura entra a 55°C en arreglo contracorriente y a 65°C en un arreglo en paralelo.

La humedad relativa es un parámetro que influye en el contenido de humedad que un sólido puede alcanzar durante la deshidratación. A menor humedad relativa la saturación del aire ocurre en un mayor tiempo. Conforme aumenta la humedad relativa, la temperatura del aire disminuye, sin importar el tipo de arreglo del proceso como se muestra en la Figura 31 y Figura 32 para un arreglo en paralelo y contraflujo respectivamente.

La velocidad del aire repercute en el consumo de energía de operación, el aumento de esta condición permite mayor remoción de humedad, pero su incremento no significa que la reducción de humedad sea proporcional, por lo que es necesario establecer un intervalo de velocidad de operación. Así mismo se analizó el efecto del tiempo de residencia del aire por etapa, se muestra que a mayor tiempo de operación mayor es la remoción de humedad. Permitiendo mayor transferencia de humedad.

Para complementar este estudio en un futuro y lograr una mayor contribución se sugiere realizar las siguientes actividades. 1) Evaluar el consumo energético total y los costos de operación para el presente caso de estudio. 2) Asistir el proceso con una bomba de calor como una oportunidad de obtener un proyecto sustentable. 3) Implementar de un modelo de optimización que permita determinar las mejores condiciones de temperatura, humedad relativa, velocidad del aire y tiempo de residencia en cada etapa, para diferentes casos de estudio.

Nomenclatura

A_{H_2O}	Actividad del agua [<i>Decimal</i>]
c_p	Calor específico $\left[\frac{kJ}{kg^{\circ}K}\right]$
Cp_{H_2O}	Calor específico de la agua 1.86 $\left[\frac{kJ}{kg^{\circ}K}\right]$
D	Constante de difusión de masa $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
E_c	Energía cinética [<i>kJ</i>]
E_p	Energía potencial [<i>kJ</i>]
H	Entalpia del aire $\left[\frac{J}{kg}\right]$
HA	Humedad absoluta en el aire $\left[\frac{kg_{agua}}{kg_{aire\ seco}}\right]$
HR	Humedad relativa del aire [%]
h_{fg}	Entalpia de vaporización del agua 2257 $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$
j	Rapidez del flujo de masa por unidad de área $\left[\frac{kg}{m^2s}\right]$
M	Contenido de humedad [%]
MR	Relación de secado [%]
\dot{m}	Flujo másico $\left[\frac{kg}{s}\right]$
P	Presión de saturación de vapor del aire [<i>mmHg</i>]
Q	Calor del aire [<i>kJ</i>]
R_v	Constante de vapor $\left[461.5\frac{J}{kg^{\circ}K}\right]$
R^2	Coficiente de determinación [<i>Adimensional</i>]
$RMSE$	Raíz del error cuadrático medio [<i>Adimensional</i>]
T	Temperatura [$^{\circ}C$]
U	Energía interna [<i>kJ</i>]
V	Velocidad del aire $\left[\frac{m}{s}\right]$
W	Trabajo [<i>kJ</i>]
χ^2	Coficiente de distribución de Pearson [<i>Adimensional</i>]

Letras griegas

v	Volumen [m^3]
ρ	Densidad del aire húmedo [$\frac{kg}{m^3}$]
ϕ	Concentración (Cantidad de masa por unidad de volumen) [$\frac{kg}{m^2}$]

Subíndices

0	Inicial
Bh	Bulbo húmedo
Bs	Bulbo seco
a	Aire
ah	Aire húmedo
aca	Agua contenida en el aire
acs	Agua contenida en el sólido
as	Aire seco
atm	Atmosférica
bh	Base húmeda
bs	Base seca
e	equilibrio
exp, i	Dato experimental
n	Final
p	producto
pre, i	Dato predicho
sh	Sólido húmedo
ss	Sólido seco
v	Vapor
vs	Vapor saturado
av	Agua vaporizada

Bibliografía

- [1] I. Para, L. a Soja, and G. Rossi, "Informativo semanal," 2014.
- [2] D. Cruz-Delgado, J. A. Leos-Rodríguez, and J. R. Altamirano-Cárdenas, "Mexico: Factors Explaining Fruit and Vegetable Production Under Free Trade," *Rev. Chapingo Ser. Hortic.*, vol. XIX, no. 3, pp. 267-278, 2013.
- [3] A. . Fallis, "Comunicado de prensa," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689-1699, 2013.
- [4] "Panorama del Chile El chile es el 8 ° cultivo con mayor valor generado en volumen de producción baja entre abril y junio . Todas las entidades del país lo cultivan , aunque la importante , la tasa media anual de crecimiento fue de éstos últimos se someten," pp. 5-6, 2014.
- [5] M. Careaga, E. Fernández, L. Dorantes, L. Mota, M. E. Jaramillo, and H. Hernandez-Sanchez, "Antibacterial activity of Capsicum extract against Salmonella typhimurium and Pseudomonas aeruginosa inoculated in raw beef meat," *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 83, no. 3, pp. 331-335, 2003.
- [6] J. Bloom and R. De Pérdidas, "IV ¿ Qué son las Pérdidas Alimentos (PDA)? Las pérdidas suceden," 2015.
- [7] C. W. Hall, "Handbook of Industrial Drying," *Dry. Technol.*, vol. 6, no. 3, pp. 571-573, 1988.
- [8] Z. Berk, *Food process engineering and technology*. 2009.
- [9] I. Doymaz, "Drying kinetics of white mulberry," *J. Food Eng.*, vol. 61, no. 3, pp. 341-346, 2004.
- [10] N. Colak and A. Hepbasli, "A review of heat pump drying: Part 1 - Systems, models and studies," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 9, pp. 2180-2186, 2009.
- [11] "El sector energético en México desde 1979 a la fecha ; Sistema de cuentas nacionales de México , Cuentas de bienes y servicios 2008 a 2013 ; Censos económicos 1999 ; Minería y extracción de petróleo ; Industria eléctrica Censos económicos 2009 . Resultado."

- [12] R. M. Seid and O. Hensel, "Experimental evaluation of sorption isotherms of chili pepper: An Ethiopian variety, Mareko Fana (*Capsicum annum* L.)," *Agric. Eng. Int. CIGR J.*, vol. 14, no. 4, pp. 163-172, 2012.
- [13] L. Wkren, M. C. Smith, and P. Harriott, *Operaciones Unitarias en Ingenieria Quimica*. .
- [14] C. L. Hii, S. V Jangam, S. P. Ong, and a S. Mujumdar, *Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations*. 2012.
- [15] M. A. M. Khraisheh, T. J. R. Cooper, and T. R. A. Magee, "Transport Mechanisms of moisture during air drying processes," *Inst. Chem. Eng.*, vol. 75, pp. 34 - 40, 1997.
- [16] N. Temperature, "Ashrae psychrometric chart no.1," no. 1, 1992.
- [17] "NOM-116-SSA1-1994," pp. 1-31, 1971.
- [18] A. S. M. S.V JANGAM, C.L. LAW, *DRYING OF FOODS, VEGETABLES AND FRUITS*. .
- [19] J. Welte-Chanes, Jorge F. Vélez-Ruiz, and G. V Barbosa-Cánovas, *Transport phenomena in food processing*. 2003.
- [20] M. A- Hossain and B. K. Bala, "Moisture Isotherm Characteristics for Red Chilli," *Dry. Technol.*, vol. 18, no. 1-2, pp. 503-515, 2000.
- [21] C. O. Akubuo, "PH– Pastharvest Technology," *Biosyst. Eng.*, vol. 83, no. 1, pp. 77-83, 2002.
- [22] S. Kaleemullah and R. Kailappan, "Moisture Sorption Isotherms of Red Chillies," *Biosyst. Eng.*, vol. 88, no. 1, pp. 95-104, 2004.
- [23] A. Arabhosseini, W. Huisman, and J. Müller, "Modeling of desorption of Alfalfa (*Medicago sativa*) stems and leaves," *Ind. Crops Prod.*, vol. 34, no. 3, pp. 1550-1555, 2011.
- [24] A. Iguaz and P. Vírveda, "Moisture desorption isotherms of rough rice at high temperatures," *J. Food Eng.*, vol. 79, no. 3, pp. 794-802, 2007.
- [25] N. A. Aviara, O. O. Ajibola, and S. A. Oni, "Sorption Equilibrium and Thermodynamic Characteristics of Soya Bean," vol. 87, pp. 179-190, 2004.

- [26] M. M. R. Williams, "The mathematics of diffusion," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 4, no. 4-5, pp. 205-206, 1977.
- [27] E. N. L. R.B Bird, W.E. Stewart, "Fenómenos de transporte."
- [28] A. Midilli and H. Kucuk, "Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy," *Energy Convers. Manag.*, vol. 44, pp. 1111-1122, 2003.
- [29] E. K. Akpinar, Y. Bicer, and C. Yildiz, "Thin layer drying of red pepper," *J. Food Eng.*, vol. 59, no. 1, pp. 99-104, 2003.
- [30] K. B. Koua, W. F. Fassinou, P. Gbaha, and S. Toure, "Mathematical modelling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava," *Energy*, vol. 34, no. 10, pp. 1594-1602, 2009.
- [31] T. Y. Tunde-Akintunde, "Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 2139-2145, 2011.
- [32] M. Aghbashlo, M. H. Kianmehr, and A. Arabhosseini, "Modeling of thin-layer drying of potato slices in length of continuous band dryer," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 5, pp. 1348-1355, 2009.
- [33] E. Meisami-asl, S. Rafiee, a. Keyhani, and a. Tabatabaeefar, "Determination of suitable thin layer drying curve model for apple slices (variety-Golab)," *Plant Omics*, vol. 3, no. 3, pp. 103-108, 2010.
- [34] S. Kaleemullah and R. Kailappan, "Drying kinetics of red chillies in a rotary dryer," *Biosyst. Eng.*, vol. 92, no. 1, pp. 15-23, 2005.
- [35] R. Perry, D. Green, and J. Maloney, *Perry's chemical engineers' handbook*, no. 7th. 1997.
- [36] F. J. Gómez-de la Cruz, J. M. Palomar-Carnicero, P. J. Casanova-Peláez, and F. Cruz-Peragón, "Experimental determination of effective moisture diffusivity during the drying of clean olive stone: Dependence of temperature, moisture content and sample thickness," *Fuel Process. Technol.*, vol. 137, pp. 320-326, 2015.

- [37] J. Jang and H. Arastoopour, "CFD simulation of a pharmaceutical bubbling bed drying process at three different scales," *Powder Technol.*, vol. 263, pp. 14-25, Sep. 2014.
- [38] M. A. Hossain and B. K. Bala, "Drying of hot chilli using solar tunnel drier," *Sol. Energy*, vol. 81, no. 1, pp. 85-92, 2007.
- [39] K. Demir and K. Sacilik, "Solar drying of Ayaş tomato using a natural convection solar tunnel dryer," *J. Food, Agric. Environ.*, vol. 8, no. 1, pp. 7-12, 2010.
- [40] A. Farhat, S. Kooli, C. Kerkeni, M. Maalej, A. Fadhel, and A. Belghith, "Validation of a pepper drying model in a polyethylene tunnel greenhouse," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 43, no. 1, pp. 53-58, 2004.
- [41] W.-C. Yang, *HANDBOOK of FLUIDIZATION and FLUID-PARTICLE SYSTEMS*. 2003.
- [42] V. . Chaughule and B. . Thorat, *Food*, vol. 3. 2011.
- [43] M. a Calva-Ramírez, "Comparación de eficiencia energética entre sistemas de secado horizontal y vertical," *Tesis de grado*, p. 148, 2007.
- [44] V. R. Sagar and P. Suresh Kumar, "Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: A review," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 47, no. 1, pp. 15-26, 2010.
- [45] G. P. Sharma, R. C. Verma, and P. B. Pathare, "Thin-layer infrared radiation drying of onion slices," *J. Food Eng.*, vol. 67, no. 3, pp. 361-366, 2005.
- [46] www.FreeLibros.me.
- [47] Z. Erbay and F. Icier, "A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 50, no. 5, pp. 441-464, 2010.
- [48] M. K. Krokida, V. T. Karathanos, Z. B. Maroulis, and D. Marinou-Kouris, "Drying kinetics of some vegetables," *J. Food Eng.*, vol. 59, no. 4, pp. 391-403, 2003.
- [49] S. Kaleemullah and R. Kailappan, "Modelling of thin-layer drying kinetics of red chillies," *J. Food Eng.*, vol. 76, no. 4, pp. 531-537, 2006.